



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Prove sull'Impianto MICOS con un bruciatore  
a tecnologia trapped vortex

*Giulietti E., Nobili M., Stringola C., Guidarelli G., Giacomazzi E.*

## PROVE SULL'IMPIANTO MICOS CON UN BRUCIATORE A TECNOLOGIA TRAPPED VORTEX

Giulietti E., Nobili M., Stringola C., Guidarelli G., Giacomazzi E. (ENEA)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: 2.2 – Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>

Responsabile Progetto: Antonio Calabrò, ENEA

<b>Unità</b> UTTEI - COMSO	<b>Classificazione UTTEI-COMSO</b> COMSO/2011/003/IL	<b>Distribuzione:</b> Libera
<b>Progetto</b> Accordo di programma MSE-ENEA - Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente		<b>Parole chiave:</b> TVC, ODC, MILD
<b>Attività</b> 2.2 Utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO <sub>2</sub>		

**Titolo**

## Prove sull'impianto MICOS con un bruciatore a tecnologia Trapped Vortex

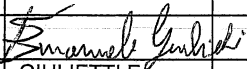


**Autori**

**Giulietti Emanuele**  
**Nobili Mirko**  
**Stringola Caterino**  
**Guidarelli Giuliano**  
**Giacomazzi Eugenio**

**Sommario**

Il presente rapporto presenta alcuni risultati ottenuti sull'impianto sperimentale del bruciatore Trapped Vortex di prima generazione installato in Casaccia. Le prove sono state effettuate mediante la tecnica ODC (Optical Diagnostics of Combustion) su un elevato numero di valori delle portate di combustibile e comburente iniettato nella prima zona di ricircolazione, aumentando progressivamente la portata di combustibile e cercando di ottenere delle condizioni termo-fluidodinamiche simili alla MILD.

La sperimentazione dovrà proseguire su un bruciatore Trapped Vortex di seconda generazione.

4							
3							
2							
1							
0		GIULIETTI E.	21-06-2011	GIAMMARTINI S.	24-06-2011	GIAMMARTINI S.	24-06-2011
Rev	Descrizione	Redazione	Data	Convalida	Data	Approvazione	Data

## INDICE

<b>1. Premessa.....</b>	<b>3</b>
1.1 Impianto TVC .....	6
1.1.1 Descrizione dell'impianto e della geometria del bruciatore TVC.....	6
1.2 Rapporti di equivalenza del TVC.....	14
<b>2. Richiami di chemiluminescenza ed energia radiante emessa dalle specie chimiche .....</b>	<b>15</b>
2.1 La radiazione elettromagnetica .....	15
2.1.1 Radiazione ultravioletta.....	18
2.1.2 Radiazione nel visibile .....	18
2.1.3 Radiazione infrarossa .....	19
2.2 Energia radiante emessa dalle specie chimiche.....	20
<b>3. Risultati .....</b>	<b>21</b>
3.1 Test-matrix e set-up sperimentale .....	21
3.2 Immagini delle fiamme .....	25
3.3 Esempio di risultati sperimentali con la metodologia ODC.....	37
3.4 Considerazioni per la sonda ODC1 .....	41
3.5 Caso particolare di $\Phi_1=1.83$ e $\Phi_{TOT}= 0.11$ .....	46
<b>4. Conclusioni.....</b>	<b>49</b>
<b>5. Bibliografia .....</b>	<b>50</b>
<b>Indice delle figure .....</b>	<b>51</b>
<b>6. LISTA di DISTRIBUZIONE del DOCUMENTO .....</b>	<b>52</b>

## 1. Premessa

Per far fronte ai cambiamenti climatici globali legati all'aumento della concentrazione dei gas serra in atmosfera, tre sono i capisaldi su cui si fondano le politiche energetiche dei Paesi più industrializzati:

- 1) incremento delle fonti rinnovabili;
- 2) diffusione del risparmio energetico in tutti i settori;
- 3) impiego delle fonti fossili investendo sempre più in tecnologie in grado di limitare le emissioni in atmosfera.


L'impossibilità di sostituire, almeno per qualche decennio, quote significative di combustibili fossili con fonti alternative a basse o nulle emissioni, rende necessario adottare soluzioni che limitino gli impatti conseguenti al loro utilizzo, e siano compatibili con gli obiettivi di contenere le alterazioni climatiche.

Queste considerazioni valgono in particolare per il carbone, in quanto esso, rappresentando ancora oggi la principale fonte per la produzione di energia elettrica (genera circa il 30% dell'elettricità dell'UE, il 50% in USA, il 75% in Cina, ..), è il combustibile a maggiore intensità di carbonio.

L'obiettivo quindi di un uso sostenibile del carbone può essere perseguito puntando al miglioramento delle efficienze energetiche – legate all'innovazione dei cicli termodinamici e all'utilizzo di materiali innovativi – ed allo sviluppo e dimostrazione di tecnologie di cattura e confinamento definitivo della CO<sub>2</sub>.

Molte delle tecnologie necessarie per la cattura ed il sequestro della CO<sub>2</sub> sono già disponibili (ad esempio la gassificazione del carbone, la produzione di ossigeno, i reattori di shift, i processi di estrazione di gas acidi da miscele di gas). Tali tecnologie possono quindi già oggi essere integrate con le moderne tecnologie in uso per ridurre drasticamente le emissioni di inquinanti ed incrementare l'efficienza energetica, al fine di iniziare la fase di dimostrazione industriale della produzione di elettricità da combustibili fossili con emissioni di CO<sub>2</sub> prossime allo zero.

Nei processi di generazione elettrica la CO<sub>2</sub> può essere separata dagli altri effluenti sia con metodi di cattura *pre-combustione*, grazie ad un trattamento del combustibile di origine fossile a monte della combustione, che con metodi di cattura *post-combustione* che si applicano sui fumi. Esiste poi una terza possibilità, che è rappresentata dall'utilizzo di sistemi a *ossi-combustione*, che

 UTTEI-COMSO	Documento Sigla <b>COMSO/2011/003/IL</b> Rev. 0	Data 24/06/2011	pag. 4 di 52
--	---	--------------------	--------------

impiegano come comburente ossigeno in luogo di aria, e che dà luogo ad un flusso di CO<sub>2</sub> molto concentrata, facilmente separabile dal restante vapore.

La **cattura effettuata a monte della combustione**, in sistemi alimentati a carbone e a gas, attuata rispettivamente nei processi di gassificazione del carbone e di reforming del metano, seguiti dalla reazione di CO-shift e della cattura della CO<sub>2</sub>, di solito praticata per assorbimento fisico, rappresenta attualmente un'opzione molto promettente che potrebbero essere impiegata in sistemi integrati con la **gassificazione del carbone (IGCC)** o in **cicli combinati a gas (NGCC)**.

Questa tecnologia pone all'attenzione dei ricercatori il problema di una **combustione efficiente, stabile** e a **basse emissioni** di un combustibile (syngas), generalmente molto ricco di idrogeno, in turbine a gas. Per questa specifica tipologia di combustibile, non sono direttamente applicabili le tecnologie che rappresentano l'attuale "stato dell'arte" per la combustione di gas naturale (NG).

Gli sforzi dell'industria sono sempre di più rivolti ad aumentare i rapporti di compressione per aumentare l'efficienza termodinamica del sistema e ridurre i consumi, bruciando il combustibile in condizioni molto diluite per minimizzare gli NO<sub>x</sub>, per cui c'è bisogno di nuove tecnologie per soddisfare tali richieste. Una nuova tecnologia molto promettente è la MILD.

Le configurazioni possibili per l'implementazione della MILD sono fondamentalmente riconducibili a due categorie [1]:

- a) sistemi MILD con controllo esterno (ricircolo esterno, sorgente indipendente di inerte, combustione sequenziale)
- b) sistemi MILD con ricircolo interno.

Il tipo di applicazione relativo al punto a) risulta teoricamente molto promettente sia dal punto di vista della riduzione degli inquinanti che dell'efficienza complessiva di impianto, tuttavia è associato ad una superiore complessità impiantistica. Le configurazioni relative al punto b) non richiedono variazioni nello schema di impianto ma sono focalizzate sul componente e pertanto hanno un potenziale applicativo più elevato. Le condizioni di alta temperatura iniziale e di elevata diluizione del comburente sono in questo caso ottenute fluidodinamicamente attraverso opportuni accorgimenti.

La tecnologia **trapped vortex** presenta diversi vantaggi [2]:

1. È possibile bruciare una grande varietà di combustibili a medio e basso potere calorifico.

2. Si può operare in regime di combustione premiscelata povera di combustibile, data la capacità di sostenere velocità di immissione molto elevate, che scongiurano il pericolo di ritorno di fiamma.
3. Le emissioni di NO<sub>x</sub> raggiungono livelli estremamente bassi senza l'aggiunta di gas diluenti di trattamenti di post-combustione, se si realizzano condizioni di combustione MILD.
4. Può essere adottata su diversi tipi di turbine grazie alla riduzione complessiva delle portate effluenti.
5. Migliora il rendimento globale del ciclo termodinamico grazie alla riduzione delle perdite di pressione nel combustore.
6. Produce l'estensione dei limiti di spegnimento e una migliore stabilità di fiamma.

Lo studio dei bruciatori TVC si inserisce nel progetto 2.2 (*“Studi sull'utilizzo dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>”*) finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico nell'ambito dell'Accordo di Programma con ENEA che ha tra i suoi obiettivi lo sviluppo di dispositivi per la combustione efficiente e stabile di syngas ad elevato tenore di H<sub>2</sub>, proveniente dalla gassificazione / idrogassificazione di carbone, fino ad arrivare all'impiego di H<sub>2</sub> puro diluito con vapore.

Il sistema sperimentale a disposizione dell'ENEA appartiene alla prima generazione di TVC[2], ed il suo impiego permetterà la messa a punto e validazione di modelli di simulazione che permettano, in una seconda fase, lo sviluppo di geometrie più avanzate.

Il bruciatore è installato sull'impianto MICOS, ed è alimentabile a gas naturale (metano), idrogeno o miscele di questi, iniettato direttamente nella prima cavità, ed è stato realizzato in modo da poter utilizzare come comburente aria o gas esausti provenienti da un bruciatore ausiliario.

Il corretto dimensionamento della cavità e del pattern fluidodinamico al suo interno, consente la creazione di vortici stabili che scambiano calore e materia con il flusso in ingresso, creando così le condizioni per l'instaurazione di un regime di combustione MILD.

L'introduzione di tecnologie MILD nella combustione pressurizzata presenta prospettive di grande interesse proprio perché è potenzialmente in grado di dare risposta a due esigenze principali: 1) un livello di emissioni molto basso e 2) un'intrinseca stabilità termoacustica (*humming*).

## 1.1 Impianto TVC

### 1.1.1 Descrizione dell'impianto e della geometria del bruciatore TVC

Il sistema sperimentale a disposizione dell'*ENEA* appartiene alla prima generazione di **TVC (Trapped Vortex Combustor)** [3] ed il suo impiego ha permesso la messa a punto e la validazione di modelli di simulazione [2] che permettono lo sviluppo di geometrie più avanzate [1].

I *combustori trapped vortex* (TVC) rappresentano certamente una promessa rispetto all'applicazione nelle turbine a syngas, grazie alla migliore efficienza, basse emissioni, grande stabilità di fiamma, flessibilità rispetto al combustibile usato e maggiore durabilità.

Oltre alle turbine i combustori *trapped vortex* sono comunque potenzialmente utilizzabili in tutte le applicazioni in cui è richiesto un bruciatore, dalle caldaie agli impianti chimici.


Il bruciatore TVC di prima generazione è installato sull'impianto **MICOS (Multipurpose Installation for Combustion Studies)**. L'impianto MICOS è un impianto multifunzionale ideato per prove di combustione ad alta temperatura policombustibile (tra cui l'idrogeno) finalizzate allo studio della termochimica e fluidodinamica dei processi e dei cicli. La sua potenza massima è pari a circa 150 kW.

Attualmente sull'impianto MICOS è installato un bruciatore sperimentale a tecnologia *Trapped Vortex* che si ispira all'idea proposta da Roquemore (2001) ([3], [4]). La Figura 1 mostra lo schema del bruciatore nel quale sono evidenti il sistema di alimentazione (zoom in Figura 2) e l'intrappolamento di due vortici (zoom in Figura 3) a valle dei due piatti usati come bluff-body (il *first after-body* e il *second after-body*).

Il corpo centrale è costituito da un asse tubolare di acciaio, il cui diametro esterno è di 14 mm (Figura 3) al cui interno sono posizionati due tubi concentrici coassiali, il più esterno per l'alimentazione aria (detta "*aria primaria*"), il più interno per l'alimentazione combustibile. Su questo asse tubolare è calettato un primo disco (*forebody*) di diametro 100 mm ( $d_f$ ) e un secondo disco, del diametro ( $d_{at}$ ) di 71.8 mm, che costituisce il *first after-body*. Questo primo disco è di spessore elevato (18 mm) in quanto l'interno cavo presenta delle intercapedini realizzate allo scopo di alimentare gas ed aria primaria agli ugelli ricavati sulla faccia interna.

La distanza ( $H$ ) tra il *forebody* e il *first after-body* (Figura 4) è variabile e determina la cavità entro cui è intrappolato il primo vortice.



 UTTEI-COMSO	Documento Sigla <b>COMSO/2011/003/IL</b> Rev. 0	Data 24/06/2011	pag. 7 di 52
--	---	--------------------	--------------

Il **combustibile** (metano o idrogeno) giunge nella cavità attraverso 8 getti prodotti da altrettanti fori ricavati nel *first after-body* (Figura 4 e Figura 5). Nel caso in cui si utilizza come combustibile l'idrogeno i fori non saranno più a sezione circolare ma ellissoide con area di  $63.24 \text{ mm}^2$  (Figura 5b). Si fa questo perché a parità di potenza termica, essendo il potere calorifico volumetrico dell'idrogeno notevolmente inferiore a quello del metano, la portata volumetrica di idrogeno, significativamente superiore, comporterebbe velocità troppo elevate a parità di area di passaggio. Nel caso del metano gli 8 fori per il combustibile sono circolari ed hanno un diametro di 6.5 mm.

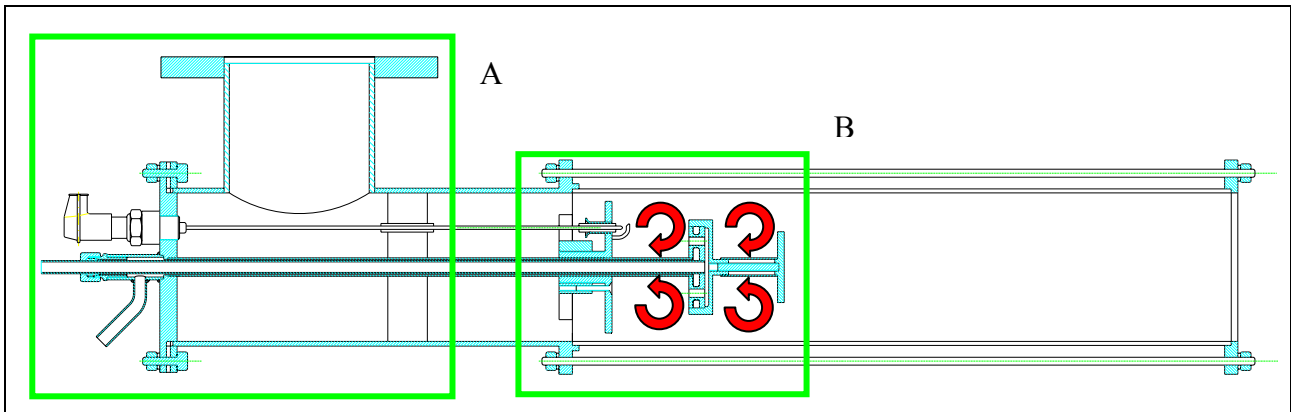
L'**aria comburente** (detta "*aria primaria*") fluisce dal *first after-body* attraverso 16 fori circolari del diametro di 3.25 mm (Figura 5a e Figura 5b).

La regione di scia dietro l'*after-body* forma una zona a bassa velocità che consuma l'eccesso di combustibile.

Mair 1965 [5] e Little and Whipkey 1978 ([6], [7]) hanno mostrato che l'aggiunta un **second after-body** permette una forte diminuzione nella resistenza perché esso riduce il moto della scia non stazionaria. Il secondo vortice riduce anche lo spegnimento locale della fiamma limitando le interazioni vortice-fiamma. E' stato quindi calettato sullo stesso asse tubolare un *second after-body* (di diametro  $d_{a2}=53.9 \text{ mm}$ ) che permette l'intrappolamento di un secondo vortice con funzioni di stabilizzazione fluidodinamica. Anche la distanza tra il *first after-body* e il *second after-body* è variabile.

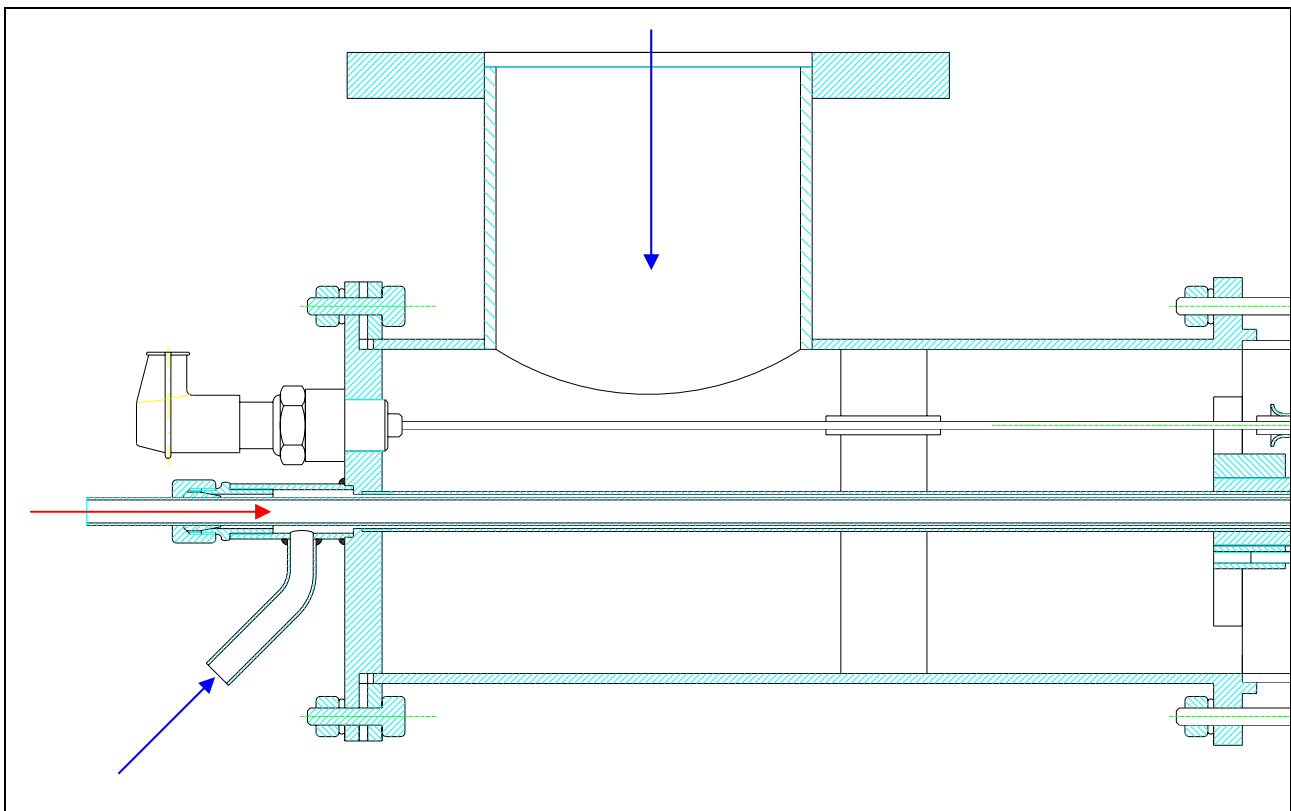
La Figura 6 e la Figura 7 mostrano alcuni particolari della realizzazione. Il bruciatore TVC è inserito all'interno di un **tubo di quarzo** (Figura 8) del diametro  $D=113 \text{ mm}$  e di lunghezza  $L=475 \text{ mm}$ , che permette la visualizzazione del flusso e il possibile utilizzo di tecniche ottiche quali: ODC, PIV, LDA, CARS.

Un flusso di "*aria secondaria o anulare*" fluisce tra la parete della camera trasparente in quarzo e il diametro esterno del *forebody*.

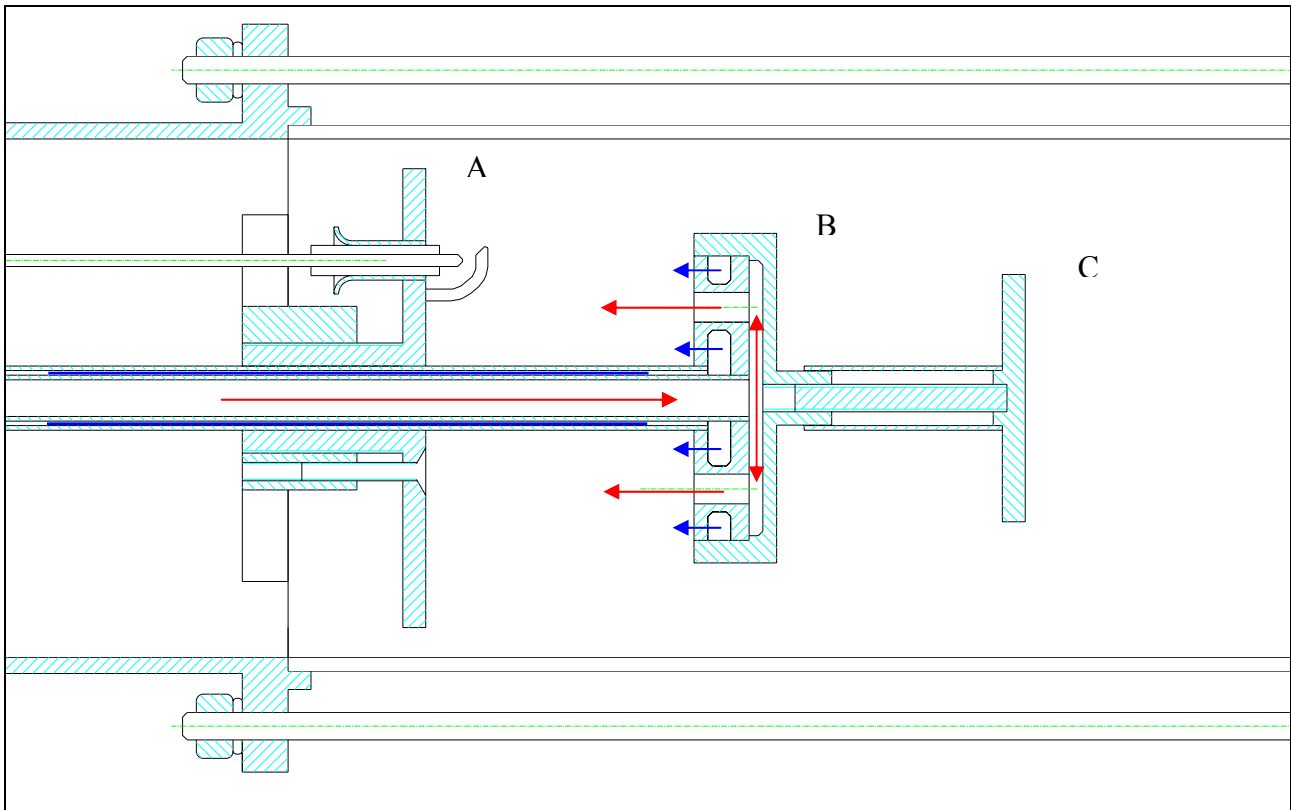


**Figura 1:** Disegno del bruciatore TVC :

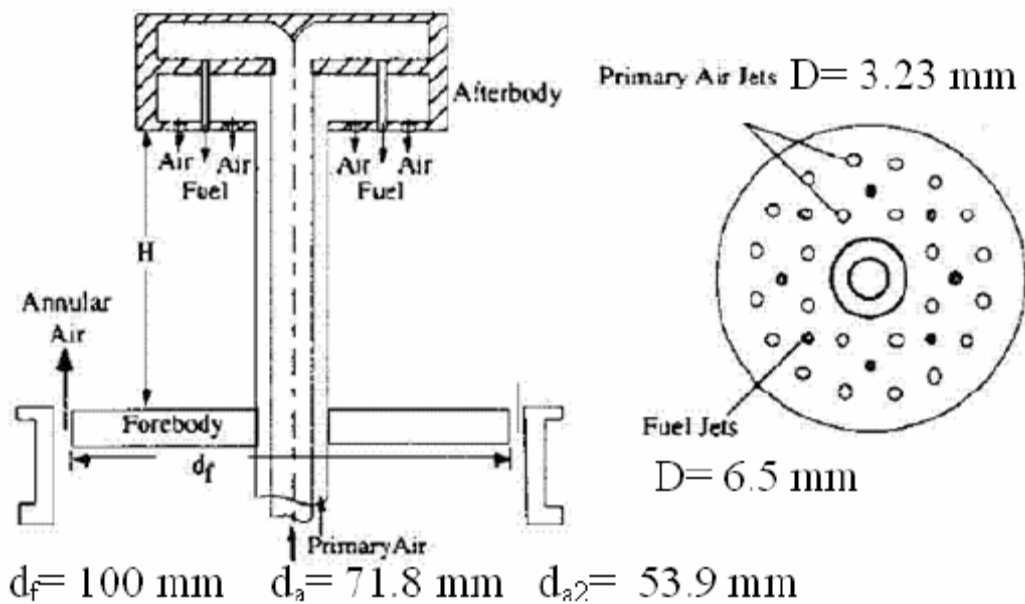
A) Condotti del sistema di alimentazione; B) Vortici intrappolati nelle due cavità.



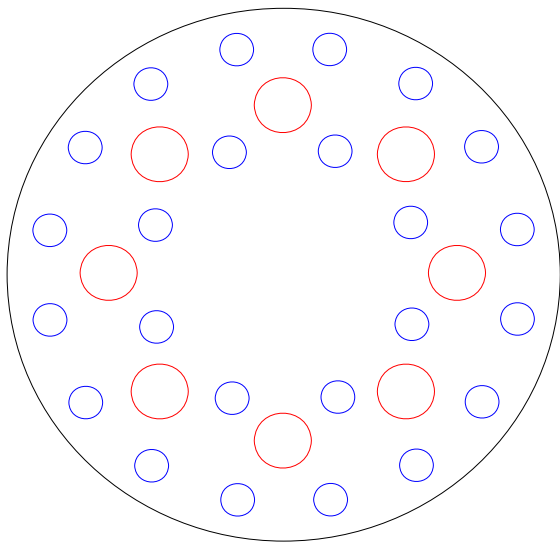
**Figura 2:** Particolare del sistema di alimentazione del bruciatore TVC: il percorso dell'aria è indicato con frecce di colore blu, quello del combustibile (CH<sub>4</sub> o H<sub>2</sub>) con frecce rosse.



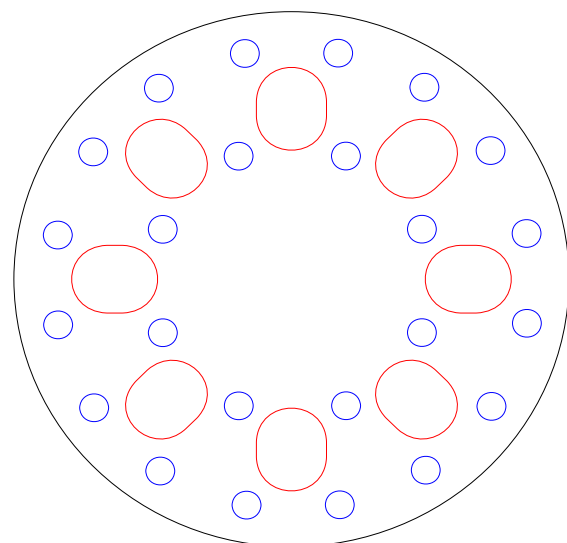
**Figura 3:** Particolare del disegno del bruciatore TVC: A) Forebody; B) First Afterbody; C) Second Afterbody. Il percorso dell'aria è indicato con frecce di colore blu, quello del combustibile (CH<sub>4</sub> o H<sub>2</sub>) con frecce di colore rosso.



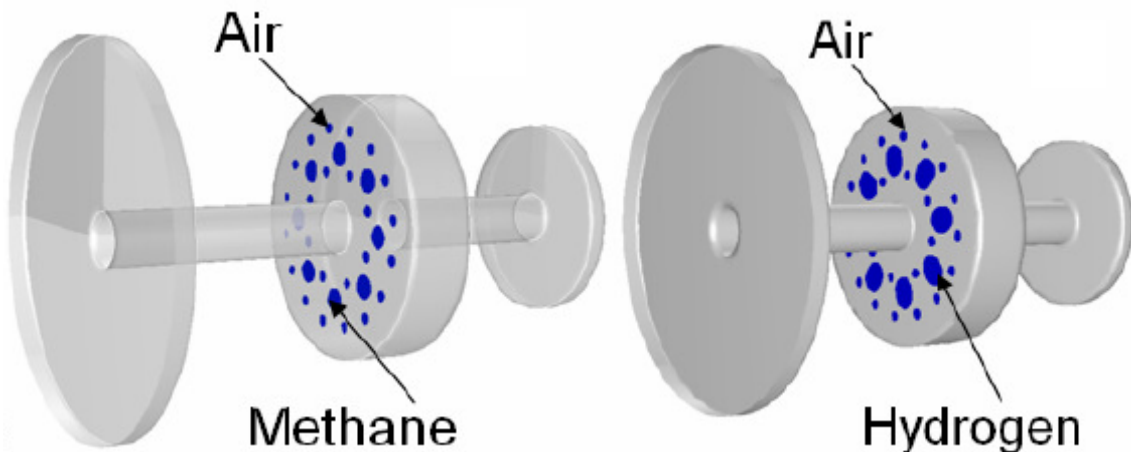
**Figura 4:** Schema del bruciatore TVC nel quale sono riportate alcune grandezze geometriche.



(a) Piatto per il CH<sub>4</sub>: 8 fori per l'uscita del combustibile (rossi in figura), 24 fori per l'uscita dell'aria (blu in figura).

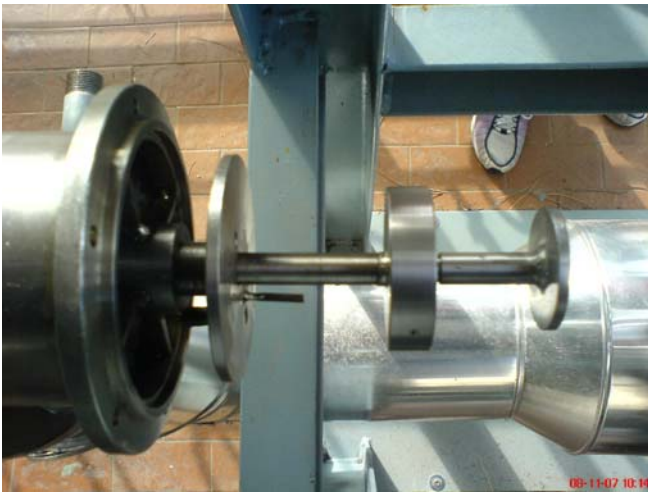


(b) Piatto per il H<sub>2</sub>: 8 fori per l'uscita del combustibile (rossi in figura), 24 fori per l'uscita dell'aria (blu in figura).



(c)

**Figura 5:** Tracciature di alimentazioni (aria + combustibile) sulla faccia interna dell'after-body. La tracciatura di figura 8(a) è quella utilizzata per il metano, mentre quella di Figura 8(b) è relativa all'idrogeno. In Figura 8(c) assonometria del TVC con indicazione schematica delle due possibili tracciature del disco di alimentazione dell'after-body.



(a)



(b)



(c)



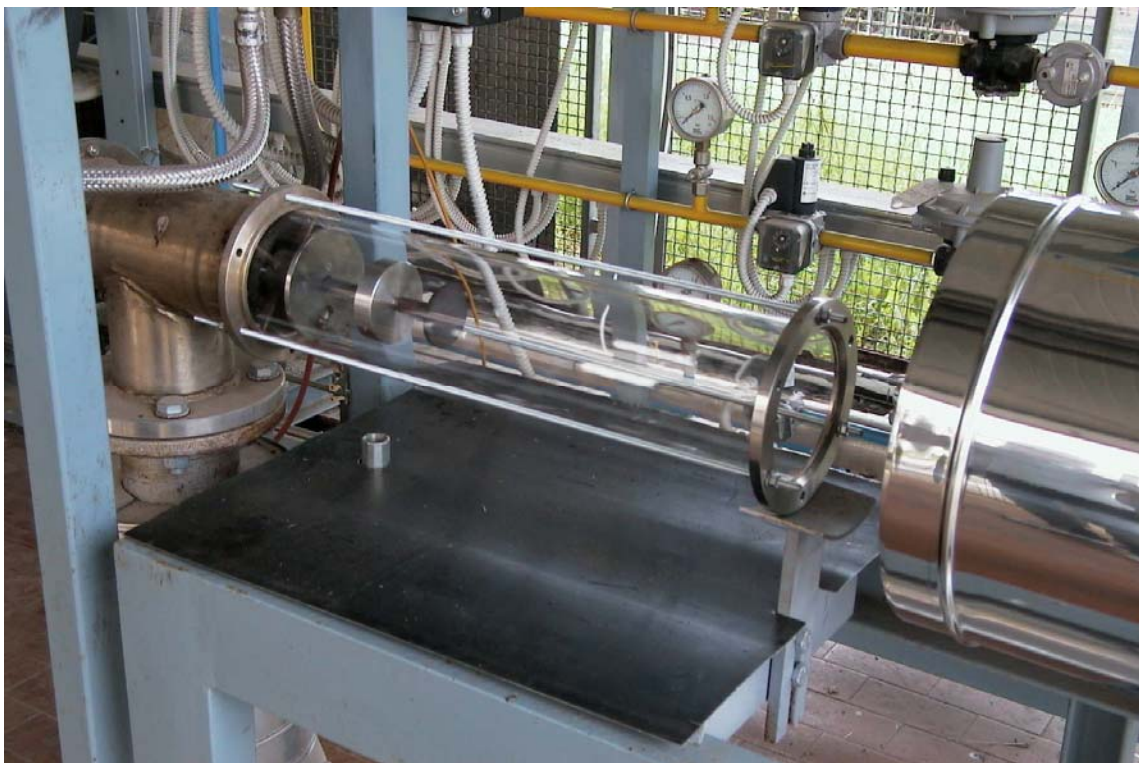
(d)

**Figura 6:** Immagini di particolari del bruciatore TVC. Nelle fotografie (b) e (d) sono evidenti i fori da cui il combustibile ( $\text{CH}_4$  o  $\text{H}_2$ ) e il comburente (Aria) vengono iniettati.



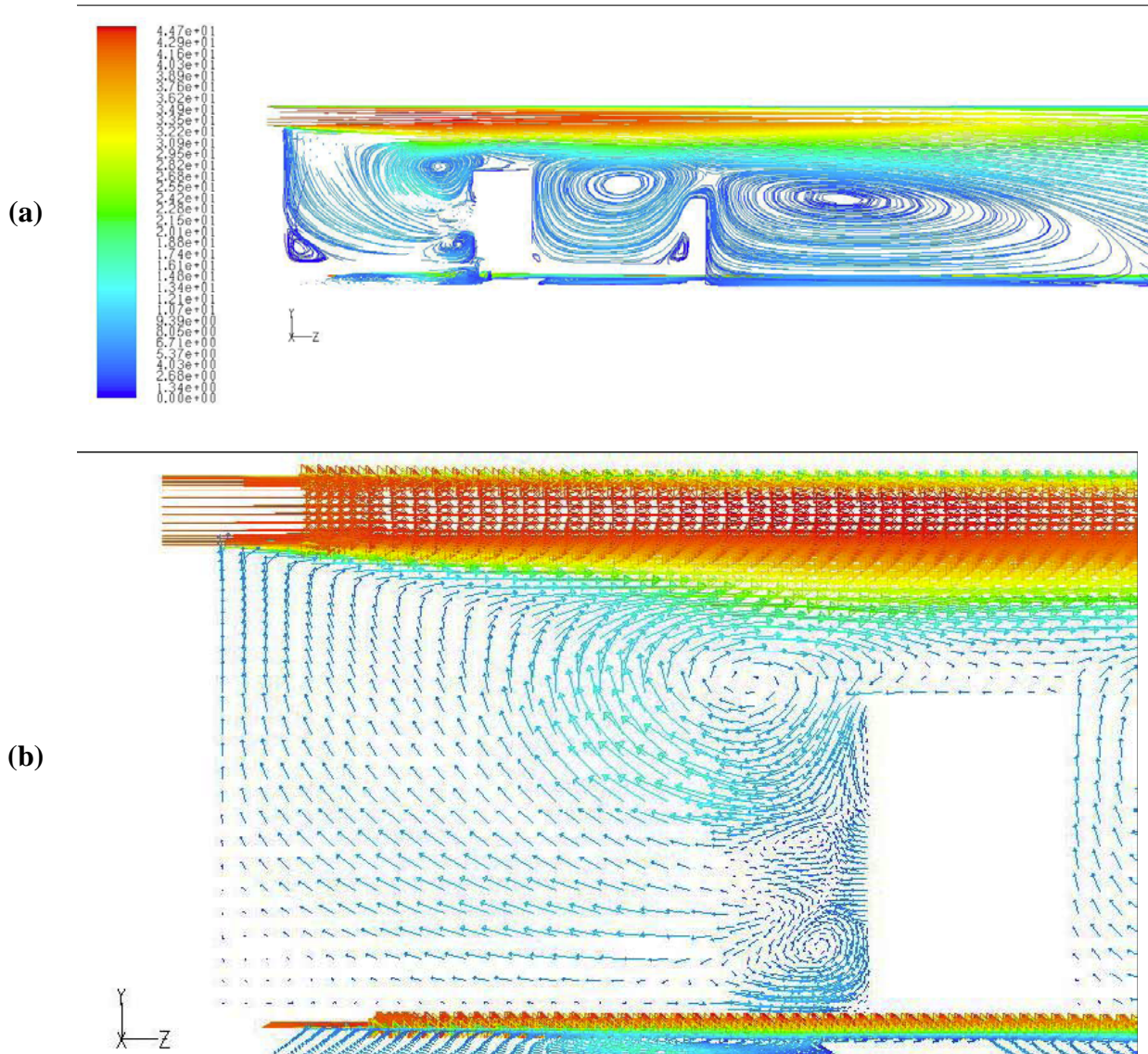


**Figura 7:** Bruciatore TVC privo del liner esterno in quarzo. In basso al centro è possibile vedere il posizionamento del rivelatore di fiamma.



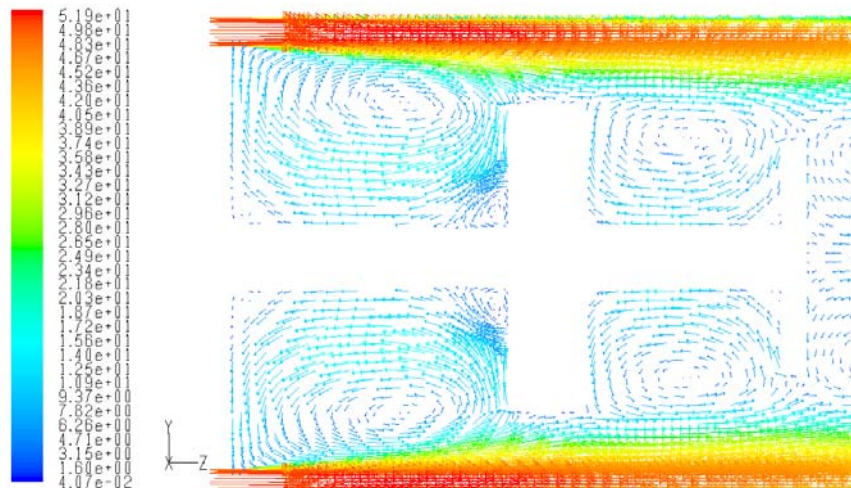
**Figura 8:** Bruciatore TVC inserito all'interno del liner in quarzo ottico che ne costituisce la camera di combustione.

Le stime di velocità con ODC per questo tipo di bruciatore sono abbastanza difficili perché la fiamma non ha un andamento assiale ma una forma toroidale con vortici secondari non trascurabili [8]. In Figura 10 sono rappresentati i vettori di velocità del flusso ricavati da una simulazione [2].



**Figura 9:** Esempio di linee di corrente di velocità (a) e i corrispondenti vettori di velocità (b) che mostrano i vortici principali nella prima cavità di questo bruciatore TVC [8].





**Figura 10:** Vettori di velocità (m/s) [2]

I vortici che si formano nella prima cavità possono produrre *shedding* di altri vortici dallo spigolo del *first after-body* oppure avere un moto in avanti e all'indietro al suo interno [8]. Tali fenomeni possono dar luogo alla presenza di picchi negli spettri di *energia cinetica* e quindi anche *energia radiante* [9].

## 1.2 Rapporti di equivalenza del TVC

I “Rapporti di equivalenza” (o “Rapporti di miscelazione”) per questa configurazione del bruciatore TVC possono essere definiti nel seguente modo:

	<b>Rapporto di Equivalenza Primario</b>	<b>Rapporto di Equivalenza Totale</b>
massico	$\Phi_1 = \frac{F_m}{O_{m\_1}} \left( \frac{F_m}{O_m} \right)_{stech.}$	$\Phi_{tot} = \frac{F_m}{(O_{m\_1} + O_{m\_2})} \left( \frac{F_m}{O_m} \right)_{stech.}$
volumetrico	$\Phi_1 = \frac{F_v}{O_{v\_1}} \left( \frac{F_v}{O_v} \right)_{stech.}$	$\Phi_{tot} = \frac{F_v}{(O_{v\_1} + O_{v\_2})} \left( \frac{F_v}{O_v} \right)_{stech.}$

dove  $F_m$  = portata massica del metano (Fuel) (kg/h)  
 $O_{m\_1}$  = portata massica di aria primaria (Oxidizer) nella miscela (kg/h)  
 $O_{m\_2}$  = portata massica di aria secondaria nella miscela (kg/h)  
 $(F_m/O_m)_{stech}$  = rapporto stechiometrico in massa =  $(1/17.2) = \mathbf{0.0581}$

$F_v$  = portata volumetrica del metano ( $m^3/h$ )  
 $O_{v\_1}$  = portata volumetrica di aria primaria nella miscela ( $m^3/h$ )  
 $O_{v\_2}$  = portata volumetrica di aria secondaria nella miscela ( $m^3/h$ )  
 $(F_v/O_v)_{stech}$  = rapporto stechiometrico in volume =  $(1/9.6) = \mathbf{0.1041}$



## 2. Richiami di chemiluminescenza ed energia radiante emessa dalle specie chimiche

### 2.1 La radiazione elettromagnetica

In fisica lo spettro elettromagnetico è l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche. Le radiazioni elettromagnetiche sono onde elettromagnetiche caratterizzate da una lunghezza d'onda  $\lambda$  e da una frequenza  $f$ .

Si ricorda che l'energia di un generico oscillatore armonico di massa  $m$ , che oscilla ad una pulsazione  $\omega$  ( $=2\pi f$ ) con ampiezza  $A$  è:

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

Poiché l'onda è un continuo di oscillatori con massa per unità di lunghezza (densità)  $\rho$ , non ci interessa tanto l'energia, ma l'energia per unità di lunghezza (densità di energia). Essa vale:

$$E = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2$$

questa densità viaggia alla velocità della luce  $c$  con cui l'onda si propaga. Quindi la grandezza finale cui siamo interessati è il prodotto della densità di energia per la velocità:

$$W = E c = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 c$$

che ha le dimensioni di una potenza (Watt), e indica esattamente il flusso di energia, cioè la quantità di energia che passa per un certo punto nell'unità di tempo.

Se pensiamo alla grandezza equivalente in una situazione tridimensionale, anziché su un'onda unidimensionale, la grandezza diviene un vettore, e si misura in  $W/m^2$ . Essa indica la quantità di energia che fluisce attraverso l'unità di superficie in una certa direzione nell'unità di tempo.

Poiché la lunghezza d'onda e la frequenza di una radiazione sono inversamente proporzionali ( $c=\lambda f$ ) tanto minore sarà la lunghezza d'onda, tanto maggiore sarà la frequenza e quindi l'energia e la potenza dell'onda a parità di ampiezza.

La cosa si poteva anche intuire conoscendo la relazione di Einstein  $E = m c^2$

Lo spettro elettromagnetico è di tipo continuo, tuttavia è possibile una suddivisione puramente convenzionale ed indicativa in vari intervalli o bande di frequenza, dettata a partire dallo spettro ottico.

Con la vista riusciamo a percepire lunghezze d'onda (che è uguale alla velocità della luce divisa per la frequenza) comprese tra i 380 e i 790 nm a cui diamo il nome di *luce visibile*.

Lunghezze d'onda minori corrispondono ai raggi *ultravioletti*, ai *raggi X* ed ai *raggi gamma* che hanno tutti quindi frequenza maggiore della luce visibile e perciò maggiore energia.

Le radiazioni *infrarosse*, le *microonde* e le *onde radio* hanno invece lunghezze d'onda maggiore della luce e trasportano energia minore.

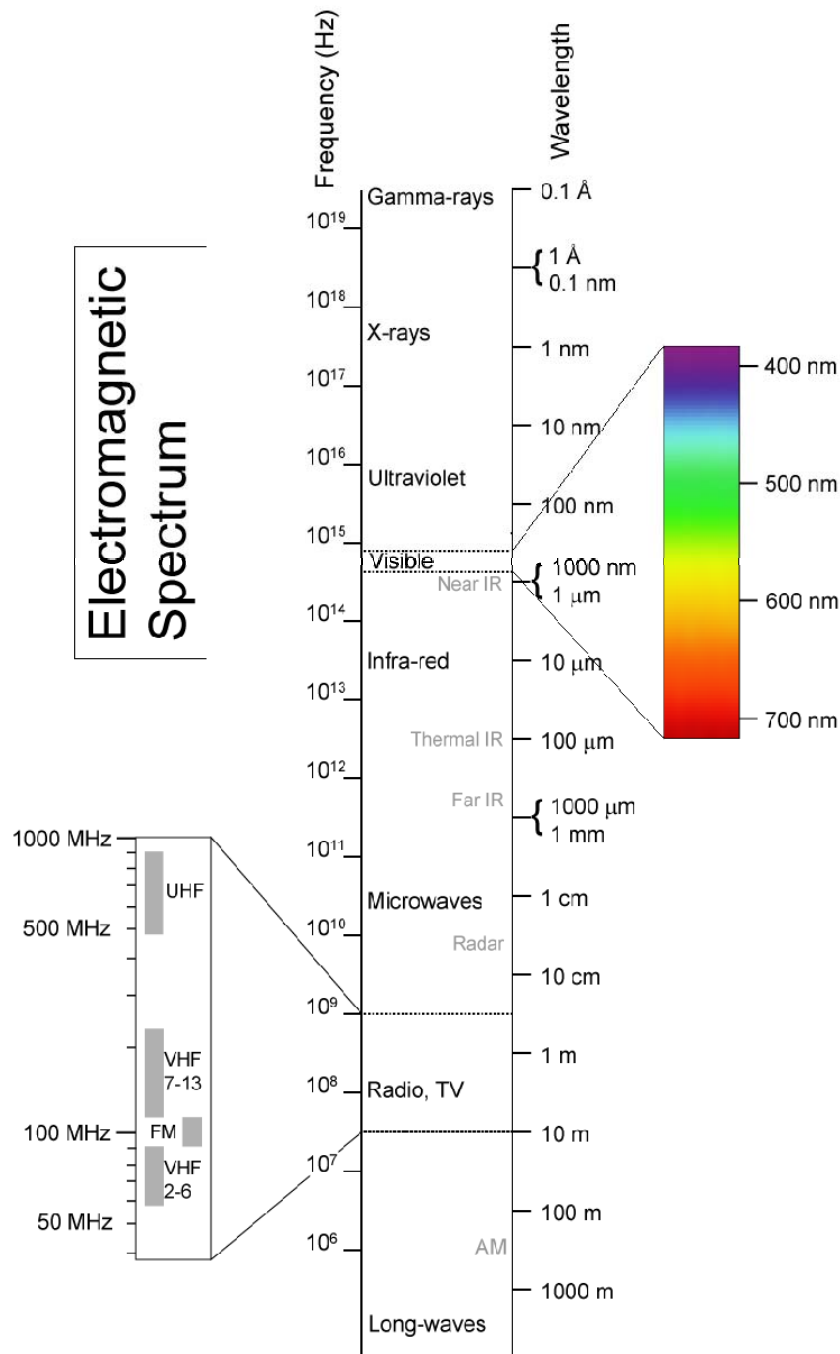
Come l'orecchio ha dei limiti nella percezione del suono, l'occhio umano ha dei limiti nella visione della luce. In entrambi i casi, vi sono limiti superiori e inferiori. Quantunque si distinguano varie zone nello spettro, non si può dire che esistano tra esse limiti netti.

<i>Tipi di radiazione</i>	<i>Lunghezza d'onda</i>
<b>Onde Radio</b>	$> 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$
<b>Microonde</b>	$10^{-3} - 10^{-1} \text{ m} = 10 \text{ cm} - 1 \text{ mm}$
<b>Infrarosso (IR)</b>	$10^{-3} - 7.6 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 1 \text{ mm} - 760 \text{ nm}$
<b>Visibile (VIS)</b>	760 - 380 nm
<b>UV vicino</b>	380 - 200 nm
<b>UV lontano</b>	200 - 10 nm
<b>Raggi X</b>	$0.1 - 10 \text{ nm} = 1 \text{ pm} - 10 \text{ nm}$
<b>Raggi gamma</b>	$< 0.1 \text{ nm} = 1 \text{ pm}$

**Tabella 1:** Suddivisione dello spettro elettromagnetico in intervalli di lunghezze d'onde.

Per quanto riguarda l'interazione tra energia radiante e materia, quando una radiazione elettromagnetica attraversa la materia vi è sempre una interazione: la radiazione trasmessa può essere meno intensa di quella incidente (assorbimento), può vibrare su di un piano diverso (polarizzazione) può assumere diverse direzioni di propagazione (riflessione, rifrazione) può viaggiare con velocità minore.

Tutto ciò dipende dal fatto che la materia (i.e. nel nostro caso i piatti che costituiscono i bluff-body) è costituita da cariche in movimento che risentono delle perturbazioni di un campo elettromagnetico.



**Figura 11:** Generico spettro elettromagnetico.



**Figura 12:** Spettro del UV, Visibile e IR.

### 2.1.1 Radiazione ultravioletta

La radiazione **ultravioletta** (UV o raggi ultravioletti) è una radiazione elettromagnetica con una lunghezza d'onda inferiore alla *luce visibile*, che va dai 10 ai 380 nm. Il nome significa “oltre il violetto”, perché il violetto è il colore visibile con la lunghezza d'onda più corta. L'UV può essere suddiviso in UV vicino e UV lontano:

- **UV vicino:** 380 – 200 nm
- **UV lontano:** 200 – 10 nm.

Quando viene considerato l'effetto dei raggi UV sulla salute umana, la gamma delle lunghezze d'onda UV viene in genere suddivisa in

- **UV-A :** 400 – 315 nm,
- **UV-B :** 315 – 280 nm,
- **UV-C :** 280 – 10 nm.

### 2.1.2 Radiazione nel visibile

Lo **spettro visibile** è quella parte dello spettro elettromagnetico che cade tra il *rosso* e il *violetto* includendo tutti i colori percepibili dall'occhio umano. La lunghezza d'onda della luce visibile nell'aria va indicativamente dai 380 ai 760 nm.

Lo spettro visibile non contiene come si può pensare tutti i colori che l'occhio e il cervello possono distinguere: il marrone, il rosa, il magenta, per esempio, sono assenti, in quanto si ottengono dalla sovrapposizione di diverse lunghezze d'onda.

I colori dell'arcobaleno nello spettro includono tutti quei colori che sono prodotti da un raggio di luce visibile di una precisa lunghezza d'onda (raggio monocromatico o puro).

Benché lo spettro sia continuo e non vi siano “salti” netti da un colore all'altro, si possono comunque stabilire degli intervalli approssimati per ciascun colore.

I sette colori dell'arcobaleno sono Rosso, Arancione, Giallo, Verde, Blu, Indaco, Violetto. Le lunghezze d'onda corrispondenti approssimativamente a questi colori sono:

- **Violetto:** 380 – 420 nm
- **Indaco:** 420 – 450 nm
- **Blu:** 450 – 495 nm
- **Verde:** 495 – 570 nm

- **Giallo:** 570 – 590 nm
- **Arancione:** 590 – 620 nm
- **Rosso:** 620 – 760 nm

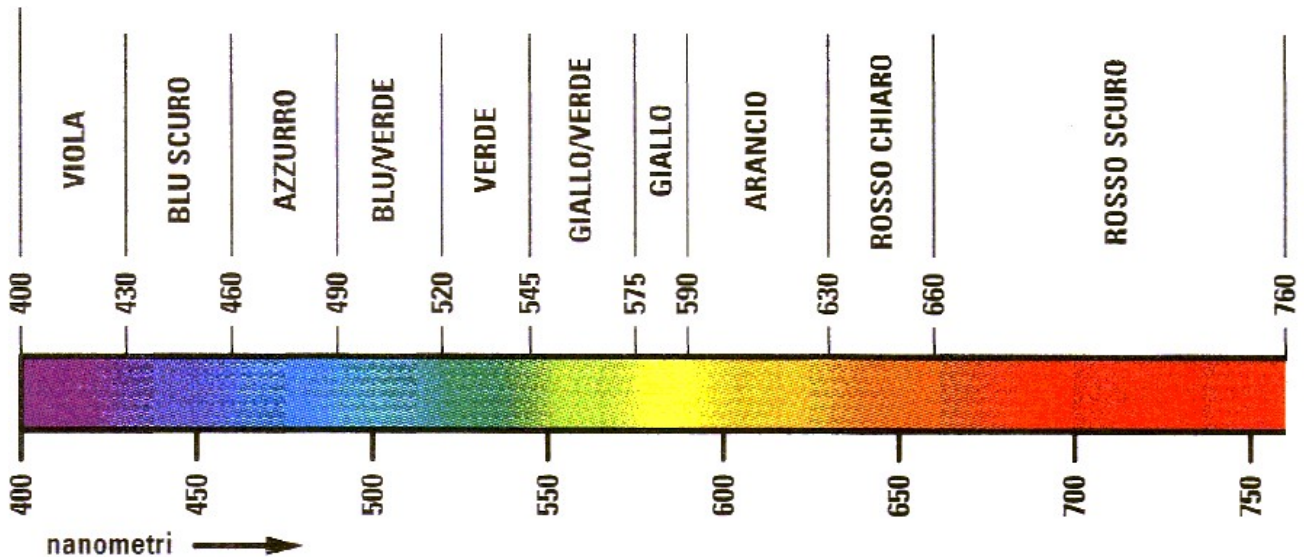


Figura 13: Spettro del Visibile e colori corrispondenti.

### 2.1.3 Radiazione infrarossa

La **radiazione infrarossa** ha una lunghezza d'onda compresa tra 760 nm e 1 mm. Viene spesso associata con i concetti di “calore” e “radiazione termica”, poiché ogni oggetto con temperatura superiore allo zero assoluto (in pratica qualsiasi oggetto reale) emette spontaneamente radiazione in questa banda (per la *legge di Wien* aumentando la temperatura il picco di emissione si sposta sempre più verso il visibile finché l'oggetto non diviene incandescente). La radiazione infrarossa viene usata in apparecchi di visione notturna, quando non c'è abbastanza luce visibile.

Nel sistema ingegneristico esiste poi la seguente distinzione tra i vari campi di infrarosso:

- **vicino (NIR):** 0.76 – 1.4  $\mu\text{m}$  = 760 – 1400 nm
- **onda corta (SWIR):** 1.4 – 3  $\mu\text{m}$  = 1400 – 3000 nm
- **onda media (MWIR):** 3 – 8  $\mu\text{m}$  = 3000 – 8000 nm
- **onda lunga (LWIR):** 8 – 15  $\mu\text{m}$  = 8000 – 15000 nm
- **lontano (FIR):** 15 – 1000  $\mu\text{m}$  = 15000 – 1000000 nm

## 2.2 Energia radiante emessa dalle specie chimiche

La *chemiluminescenza* (a volte si usa il termine *chemioluminescenza*) consiste fondamentalmente nell'emissione di radiazioni luminose ed è quindi l'emissione di radiazione elettromagnetica, in particolare nel visibile e nel vicino infrarosso, che può accompagnare una reazione chimica esoergonica. In pratica la reazione porta al prodotto P in uno stato eccitato ed il decadimento allo stato fondamentale non porta alla formazione di calore ma di fotoni. Gli elettroni eccitati ritornano dallo stato eccitato a quello fondamentale. L'energia potenziale delle transizioni elettroniche all'interno degli atomi o delle molecole viene così liberata sotto forma di luce.

La causa principale di emissioni luminose non termiche proviene da processi di eccitazione chimica. Nei processi di combustione, le alte temperature raggiunte nella zona di reazione portano al raggiungimento di alte concentrazioni di radicali e atomi spesso superiori alla concentrazione richiesta all'equilibrio, e alcune reazioni che coinvolgono queste specie sono sufficientemente esotermiche da dare luogo a prodotti caratterizzati da uno stato elettronico eccitato (ovvero non in equilibrio termico), con livelli di energia quantizzati.

La caratteristica importante della *chemiluminescenza* per il controllo della combustione è la possibilità di collegarla ad alcuni parametri importanti nelle fiamme. La luce emessa dall' $\text{OH}^*$  è più intensa in condizioni magre fino a stechiometriche mentre il  $\text{CH}^*$  e il  $\text{C}_2^*$  sono più forti in condizioni di miscela ricca.

Dal momento che l'intensità dell'emissione è generalmente proporzionale alla velocità di produzione chimica di determinate specie, l'intensità della emissione può essere correlata alla velocità delle reazioni chimiche. Per questo motivo, la chemiluminescenza è stata usata come una misura in prima approssimazione della velocità di rilascio termico e anche del rapporto di equivalenza.

Nella zona di reazione della fiamma si possono formare molti radicali instabili, ad esempio CH,  $\text{C}_2$ , HCO, NH,  $\text{NH}_2$  etc., i quali emettono nel campo del *visibile* (380-760 nm) e del *vicino ultravioletto* (200-380 nm). Il contributo della parte *visibile* viene principalmente dal cono interno di una fiamma Bunsen. La parte del *vicino infrarosso* (760-1400 nm) deriva invece principalmente dai prodotti dei gas combusti.

Nelle fiamme di idrocarburi la principale fonte di chemiluminescenza sono i radicali  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$ ,  $\text{CO}_2$  :

- L'emissione dello spettro del **radicale  $\text{OH}^*$**  avviene nel campo del *visibile* e dell'*ultravioletto* (UV-VIS) e presenta un'ampia struttura con un grande picco a  $\lambda=306.4$  nm.

- Anche lo spettro del *radicale CH\** è nella regione del *visibile* e *ultra-violetto (UV-VIS)*. Tre sono le bande di emissione del radicale CH\* nella parte interna del cono delle fiamme di idrocarburi; il più forte è intorno ai  $\lambda=431.5 \text{ nm}$  (*blu scuro* nella regione del visibile), un altro è tra  $\lambda=362.8 \text{ nm}$  e  $420.0 \text{ nm}$ , mentre l'ultimo avviene nel vicino ultravioletto  $\lambda=315.0 \text{ nm}$ .
- Il *radicale C<sub>2</sub>\** emette intorno a  $\lambda=519 \text{ nm}$  nella regione del *visibile*, e precisamente nella regione del *verde*.
- Il *radicale CO<sub>2</sub>* presenta invece uno spettro di emissione continuo ma presenta un picco intorno nella regione dell'*infrarosso* a  $\lambda=10600 \text{ nm}$ .

Nelle fiamme di idrocarburi *magre* il radicale OH\* è il responsabile per la maggior parte delle emissioni, seguito poi dal radicale CH\*, mentre l'emissione di C<sub>2</sub>\* è poca. Le fiamme *ricche* sono invece caratterizzate da una più forte emissione nelle bande del CH\* e C<sub>2</sub>\*.

### 3. Risultati

#### 3.1 Test-matrix e set-up sperimentale

Fissata una geometria del bruciatore TVC ( $z_1=70 \text{ mm}$  e  $z_2=50 \text{ mm}$ ) sono state effettuate prove a diversi rapporti di equivalenza primari ( $\Phi_1$ ) e diversi rapporti di equivalenza totali ( $\Phi_{TOT}$ ), mantenendo costante la portata di aria primaria ( $O_{v\_1}=10.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) e variando sia la portata di aria secondaria ( $O_{v\_2}=160 \text{ Nm}^3/\text{h}$  oppure  $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) sia la portata del gas metano iniettato nella prima zona di ricircolazione (nel range  $0.4 - 5.7 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ). Nelle seguenti tabelle sono mostrate le test-matrix delle prove effettuate (Tabella 2 e Tabella 3).

Per riuscire meglio ad intrappolare il vortice nella prima cavità e quindi ottenere un migliore mescolamento del comburente e combustibile si è pensato di aumentare il diametro del *first after-body* inserendo una corona circolare del diametro esterno di  $86 \text{ mm}$  (Figura 14a).

Le prove sono state effettuate posizionando quattro sonde ODC come mostrato in Figura 14.

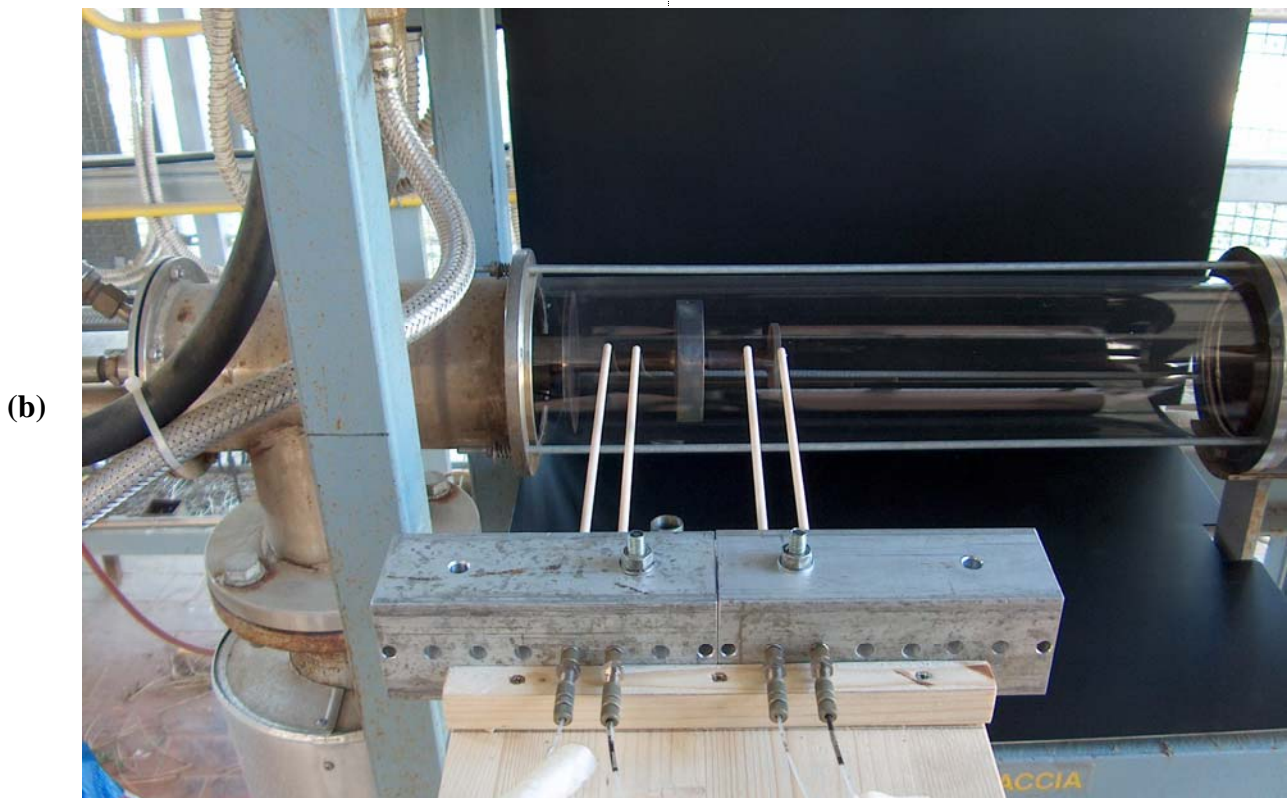
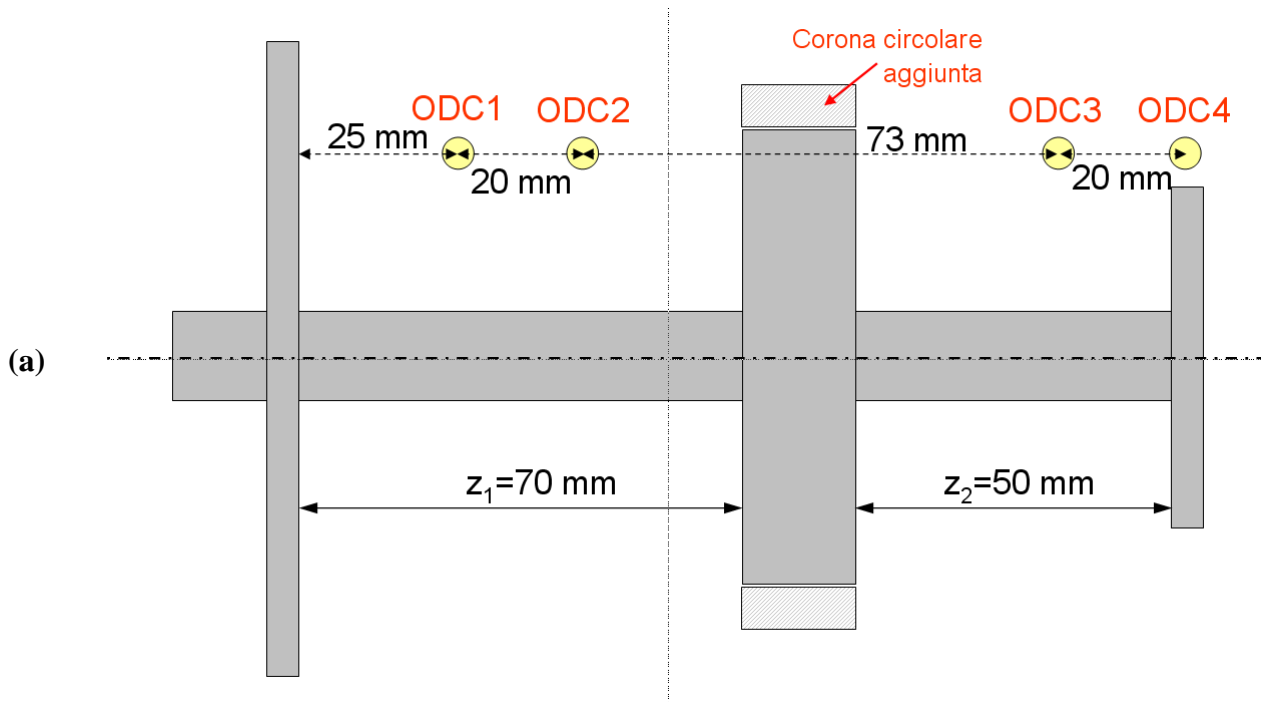
N°	z <sub>1</sub> [mm]	z <sub>2</sub> [mm]	Aria Secondaria O <sub>v,2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Aria Primaria O <sub>v,1</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Gas TVC F <sub>v</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	COMMENTI
1	70	50	160	10.5	0.4	E' una fiamma molto stabile e tranquilla. Φ <sub>1</sub> = 0.37 Φ <sub>tot</sub> = 0.02 P = 3 kWt
2	70	50	160	10.5	0.9	Φ <sub>1</sub> = 0.82 Φ <sub>tot</sub> = 0.05 P = 7 kWt
3	70	50	160	10.5	2.0	Φ <sub>1</sub> = 1.83 Φ <sub>tot</sub> = 0.11 P = 16 kWt
4	70	50	160	10.5	3.0	Φ <sub>1</sub> = 2.74 Φ <sub>tot</sub> = 0.17 P = 24 kWt
5	70	50	160	10.5	4.4	E' instabile Φ <sub>1</sub> = 4.03 Φ <sub>tot</sub> = 0.25 P = 36 kWt
6	70	50	160	10.5	5.7	E' fortemente instabile. L'ultimo disco è ROSSO!!! Φ <sub>1</sub> = 5.21 Φ <sub>tot</sub> = 0.32 P = 46 kWt

**Tabella 2:** Test-matrix delle prove effettuate con la portata di aria secondaria O<sub>v,2</sub> = 160 Nm<sup>3</sup>/h, sia con la corona circolare aggiuntiva che senza.




N°	z <sub>1</sub> [mm]	z <sub>2</sub> [mm]	Aria Secondaria O <sub>v,2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Aria Primaria O <sub>v,1</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Gas TVC F <sub>v</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	COMMENTI
7	70	50	120	10.5	0.4	E' una fiamma molto stabile e tranquilla. Φ <sub>1</sub> = 0.37 Φ <sub>tot</sub> = 0.03 P = 3 kWt
8	70	50	120	10.5	0.9	Φ <sub>1</sub> = 0.82 Φ <sub>tot</sub> = 0.07 P = 7 kWt
9	70	50	120	10.5	2.0	Oscilla (ha un bel picco) ma è sicura Φ <sub>1</sub> = 1.83 Φ <sub>tot</sub> = 0.15 P = 16 kWt
10	70	50	120	10.5	3.0	Φ <sub>1</sub> = 2.74 Φ <sub>tot</sub> = 0.22 P = 24 kWt
11	70	50	120	10.5	4.4	E' fortemente instabile. L'ultimo disco è ROSSO!!! Φ <sub>1</sub> = 4.03 Φ <sub>tot</sub> = 0.32 P = 36 kWt
12	70	50	120	10.5	5.7	E' fortemente instabile. L'ultimo disco è ROSSO!!! Φ <sub>1</sub> = 5.21 Φ <sub>tot</sub> = 0.42 P = 46 kWt

**Tabella 3:** Test-matrix delle prove effettuate con la portata di aria secondaria O<sub>v,2</sub> = 120 Nm<sup>3</sup>/h, sia con la corona circolare aggiuntiva che senza.



**Figura 14:** Schema del set-up sperimentale in cui si evidenzia la posizione delle sonde ODC durante l'acquisizione (a) e immagine del set-up (b).

 UTTEI-COMSO	Documento Sigla <b>COMSO/2011/003/IL</b> Rev. 0	Data 24/06/2011	pag. 25 di 52
--	---	--------------------	---------------

### 3.2 Immagini delle fiamme

Nelle seguenti figure sono state riportate le immagini della fiamma nel TVC al variare della portata di combustibile nel caso in cui non si sia inserita la corona circolare al *first after-body* (Figura 15 per una portata di aria secondaria di 160 Nm<sup>3</sup>/h; Figura 16 per una portata di aria secondaria di 120 Nm<sup>3</sup>/h) e nel caso in cui si sia messa (Figura 17 per una portata di aria secondaria di 160 Nm<sup>3</sup>/h; Figura 18 per una portata di aria secondaria di 120 Nm<sup>3</sup>/h).

Nella Figura 15a con portata di aria secondaria di 160 Nm<sup>3</sup>/h e senza la corona circolare aggiuntiva la miscela è molto magra e la zona reagente sta nella zona centrale della prima cavità. Aumentando la portata di combustibile si forma uno *shear-layer* dal bordo del primo piatto e la combustione appare maggiormente volumetrica. Nel caso di miscela molto ricca nella prima cavità ( $\Phi_1=4.03$  in Figura 15e, e  $\Phi_1=5.21$  in Figura 15f) si ha la formazione di una zona ricca di gas incombusti (evidenziati dal colore giallo) i quali vengono poi trasportati dalla corrente a valle del *first after-body* e scaldano talmente tanto il *second after-body* da renderlo incandescente.

Con una portata di aria secondaria di 120 Nm<sup>3</sup>/h, e quindi inferiore rispetto al caso precedente, si osservano vari casi. Confrontando la condizione  $\Phi_1=2.74$  (Figura 15d e Figura 16 c) il bruciatore funziona peggio e la presenza di gas combusti si verifica prima del caso precedente, ma confrontando la condizione  $\Phi_1=4.03$  (Figura 15e e Figura 16d) la combustione sembra migliore e più omogenea in questo secondo caso.

L'inserimento della corona circolare (Figura 17 e Figura 18) facilita l'intrappolamento del vortice nella prima cavità e quindi il mescolamento dei prodotti dando luogo ad una migliore combustione. Basta ad esempio confrontare le figura 12abc con le corrispondenti figura 14abc.

La migliore condizione di combustione si verifica per una portata di aria secondaria di 160 Nm<sup>3</sup>/h e  $\Phi_1=1.83$  (Figura 17c), evidenziando un probabile comportamento simile alla MILD, nel quale sembra avvenire una combustione volumetrica. Andando verso valori di miscela grassi la combustione peggiora, si evidenziano zone ad alta concentrazione di incombusti e la corona circolare e il *second after-body* diventano incandescenti.

Un comportamento analogo è possibile riscontrarlo per una portata di aria secondaria di 120 Nm<sup>3</sup>/h (Figura 18).

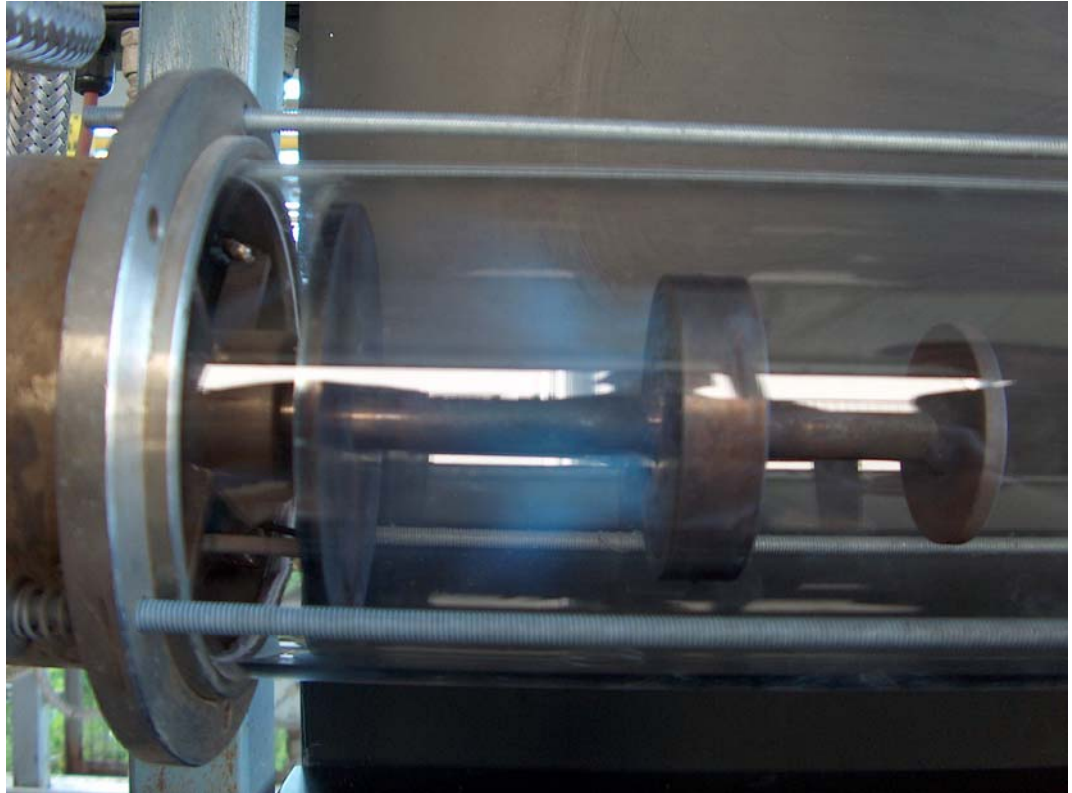
**a)**

$$\Phi_1 = 0.37$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.02$$

$$F_v = 0.4 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 3 \text{ kW}$$

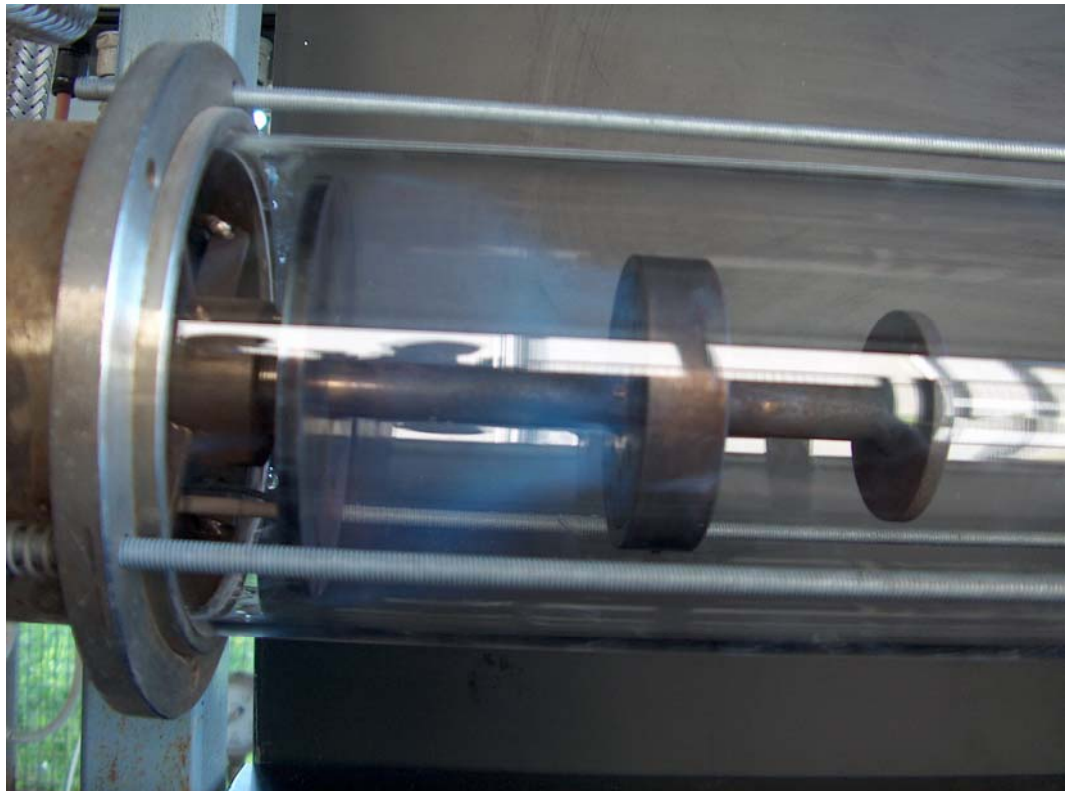
**b)**

$$\Phi_1 = 0.82$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.05$$

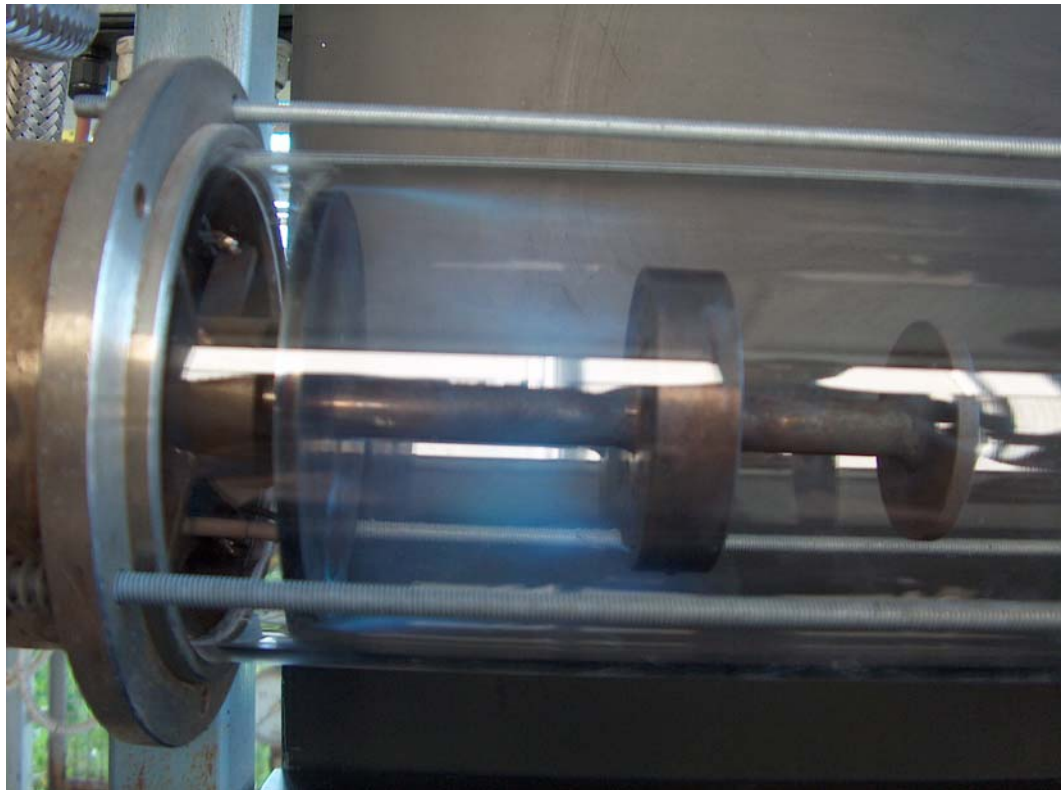
$$F_v = 0.9 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 7 \text{ kW}$$

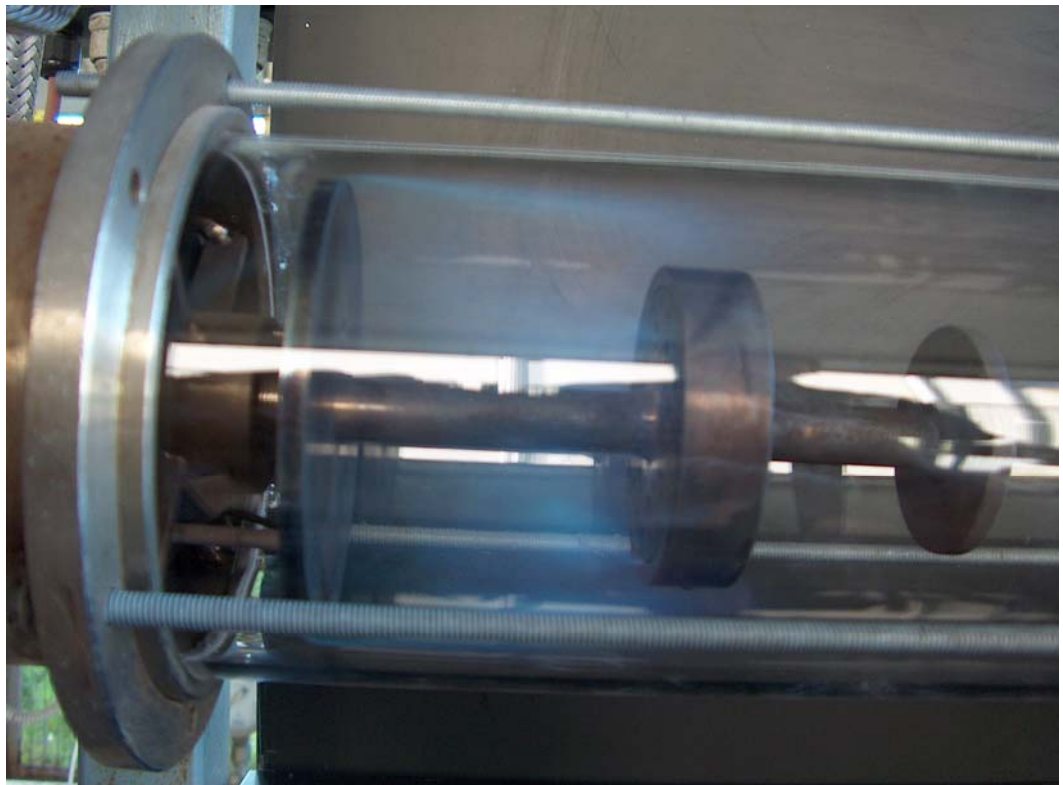




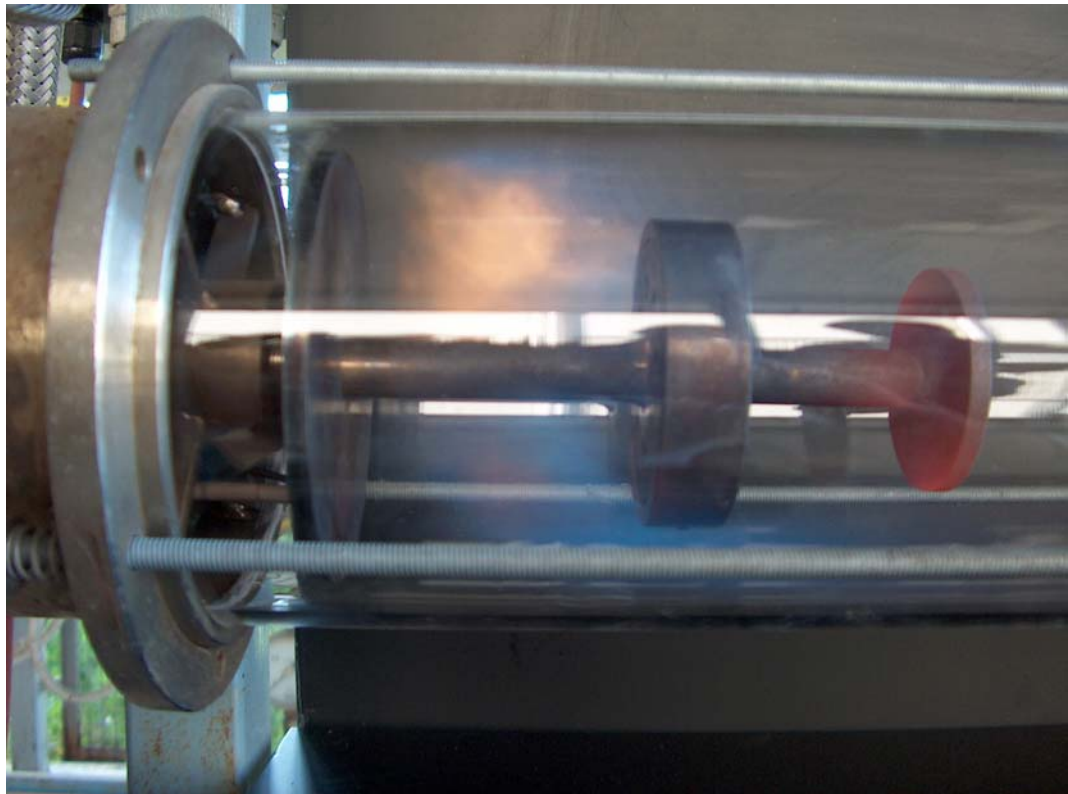
c)  
 $\Phi_1 = 1.83$   
 $\Phi_{tot} = 0.11$   
 $F_v = 2 \text{ Nm}^3/\text{h}$   
 $P = 16 \text{ kW}$



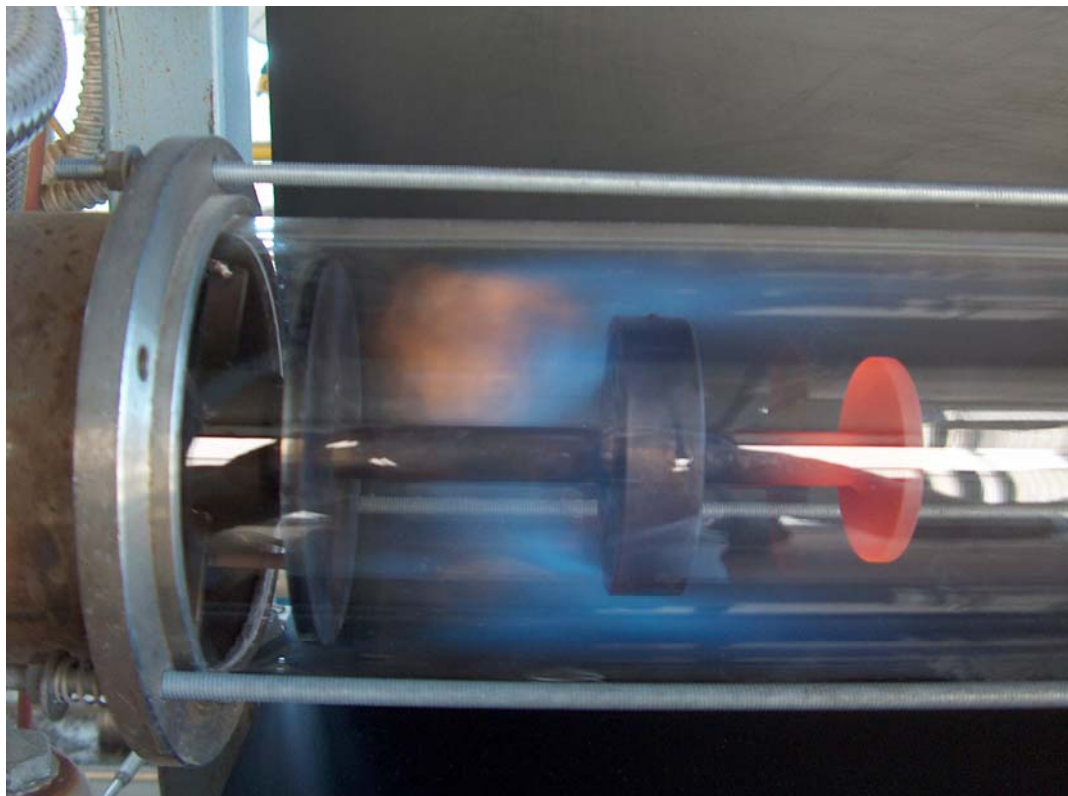
d)  
 $\Phi_1 = 2.74$   
 $\Phi_{tot} = 0.17$   
 $F_v = 3 \text{ Nm}^3/\text{h}$   
 $P = 24 \text{ kW}$



e)  
 $\Phi_1 = 4.03$   
 $\Phi_{tot} = 0.25$   
 $F_v = 4.4 \text{ Nm}^3/\text{h}$   
 $P = 36 \text{ kW}$



f)  
 $\Phi_1 = 5.21$   
 $\Phi_{tot} = 0.32$   
 $F_v = 5.7 \text{ Nm}^3/\text{h}$   
 $P = 46 \text{ kW}$



**Figura 15:** Immagini con il *first after-body* a dimensioni normali (senza corona circolare aggiuntiva), portata di Aria Primaria ( $O_{v_1}$ ) di  $10.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  e Aria Secondaria ( $O_{v_2}$ ) di  $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .



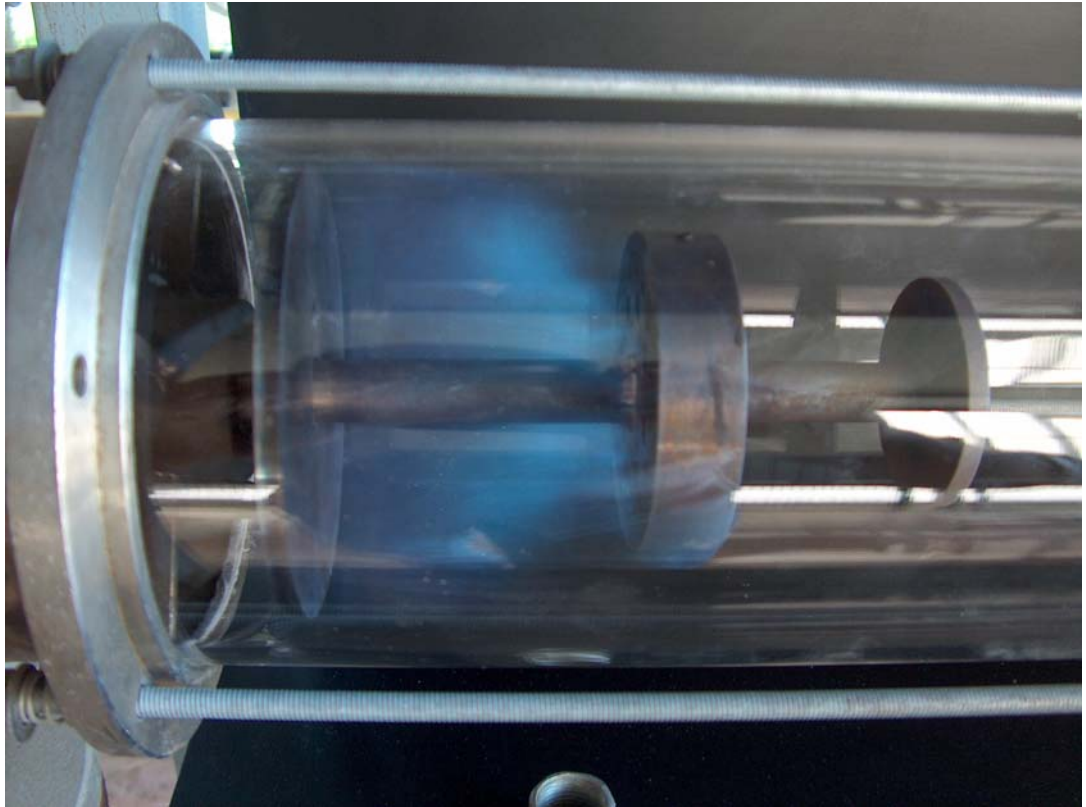
**a)**

$$\Phi_1 = 0.82$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.07$$

$$F_v = 0.9 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 7 \text{ kW}$$

**b)**

$$\Phi_1 = 1.83$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.15$$

$$F_v = 2 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 16 \text{ kW}$$



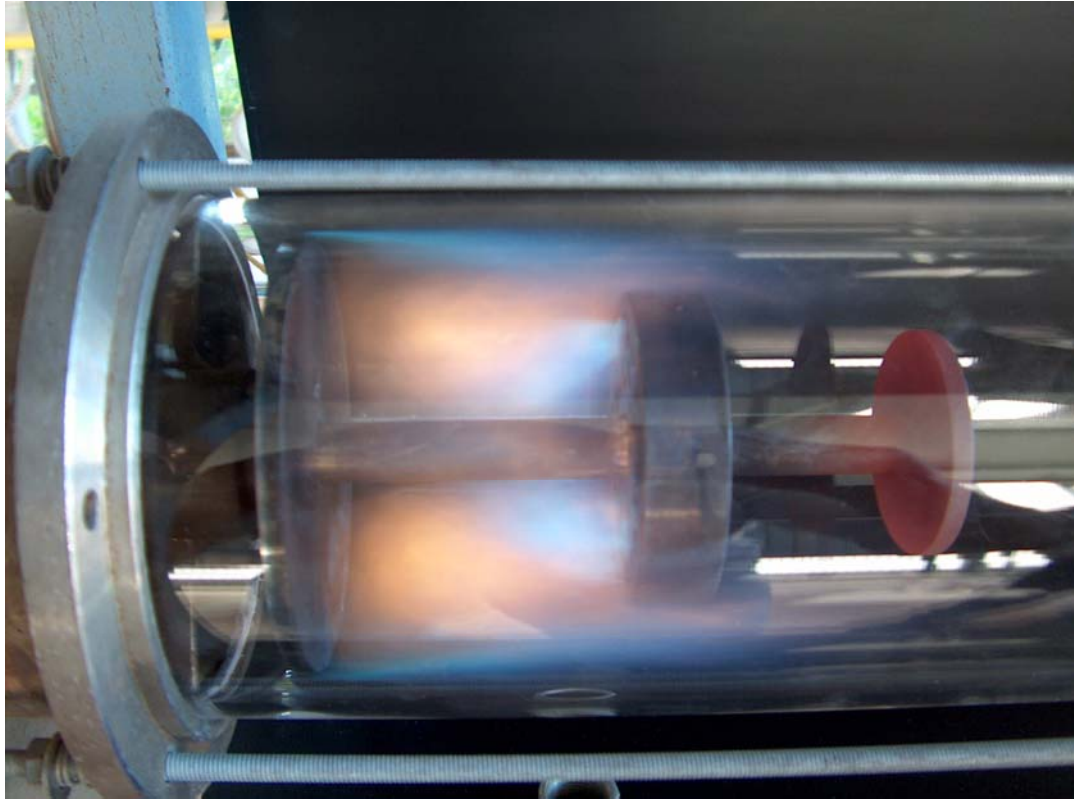
c)

$$\Phi_1 = 2.74$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.22$$

$$F_v = 3 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 24 \text{ kW}$$



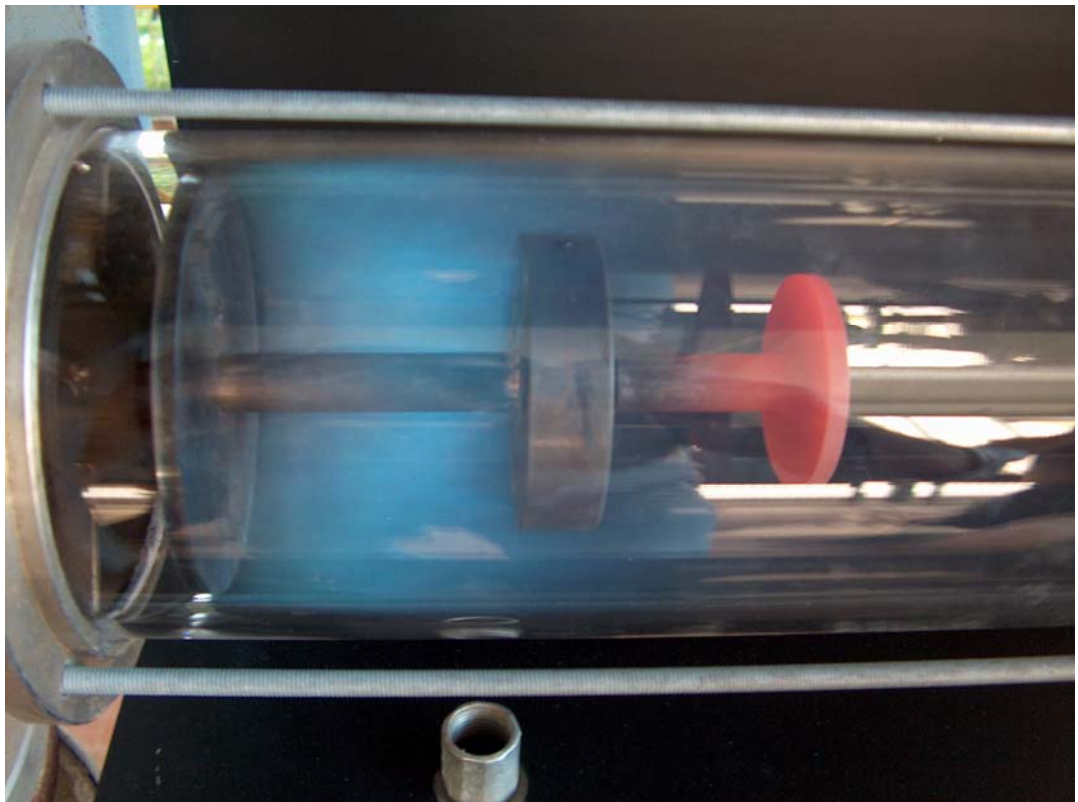
d)

$$\Phi_1 = 4.03$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.32$$

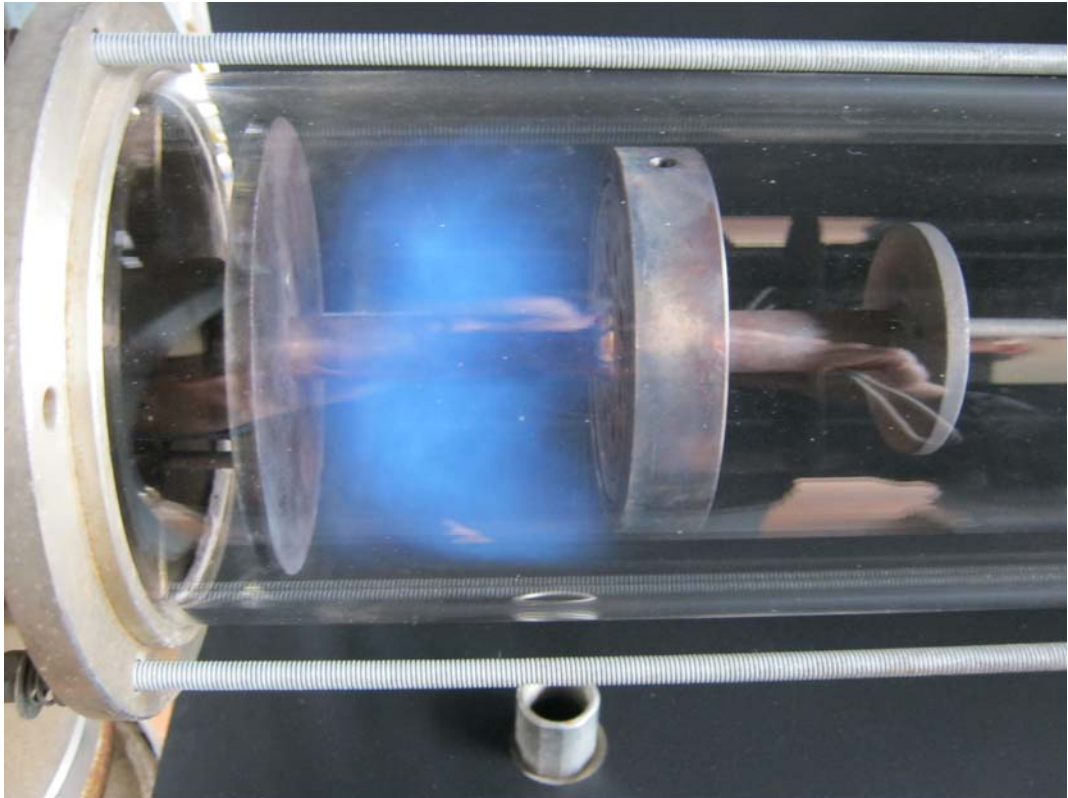
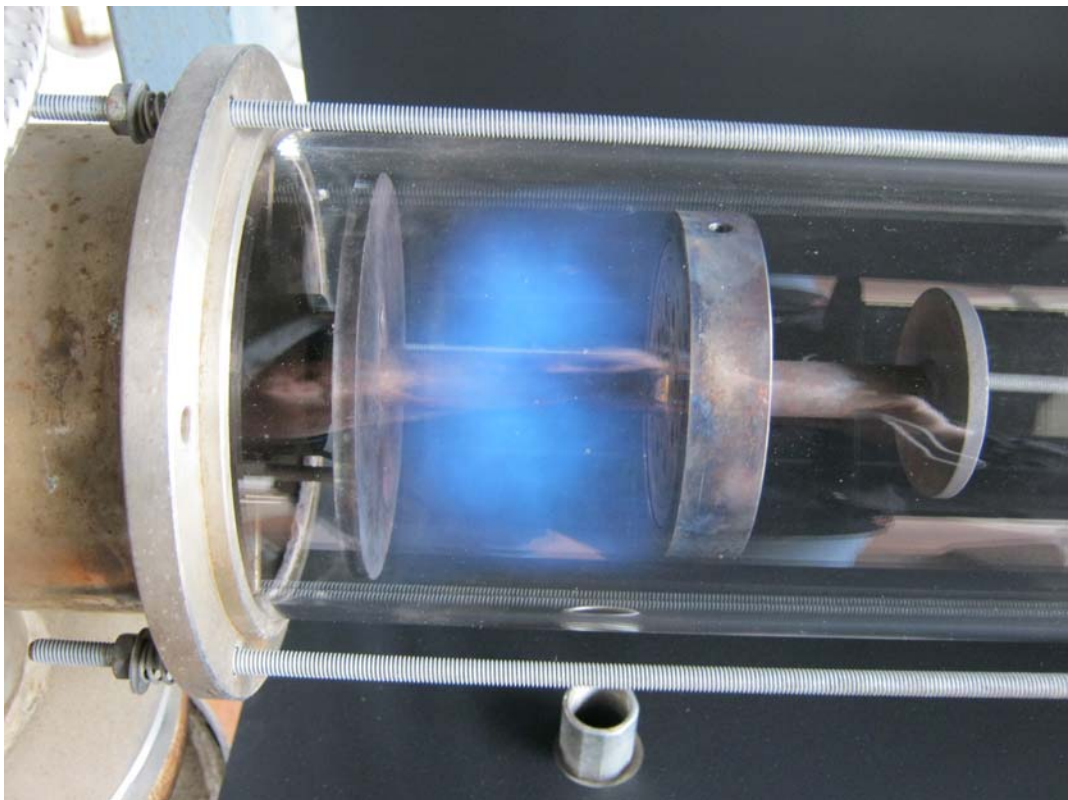
$$F_v = 4.4 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 36 \text{ kW}$$



**Figura 16:** Immagini con il *first after-body* a dimensioni normali (senza corona circolare aggiuntiva), portata di Aria Primaria ( $O_{v_1}$ ) di  $10.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  e Aria Secondaria ( $O_{v_2}$ ) di  $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .



**a)** $\Phi_1 = 0.37$   
 $\Phi_{tot} = 0.02$   
 $F_v = 0.4$   
 $Nm^3/h$   
 $P = 3 \text{ kW}$ **b)** $\Phi_1 = 0.82$   
 $\Phi_{tot} = 0.05$   
 $F_v = 0.9$   
 $Nm^3/h$   
 $P = 7 \text{ kW}$ 

c)

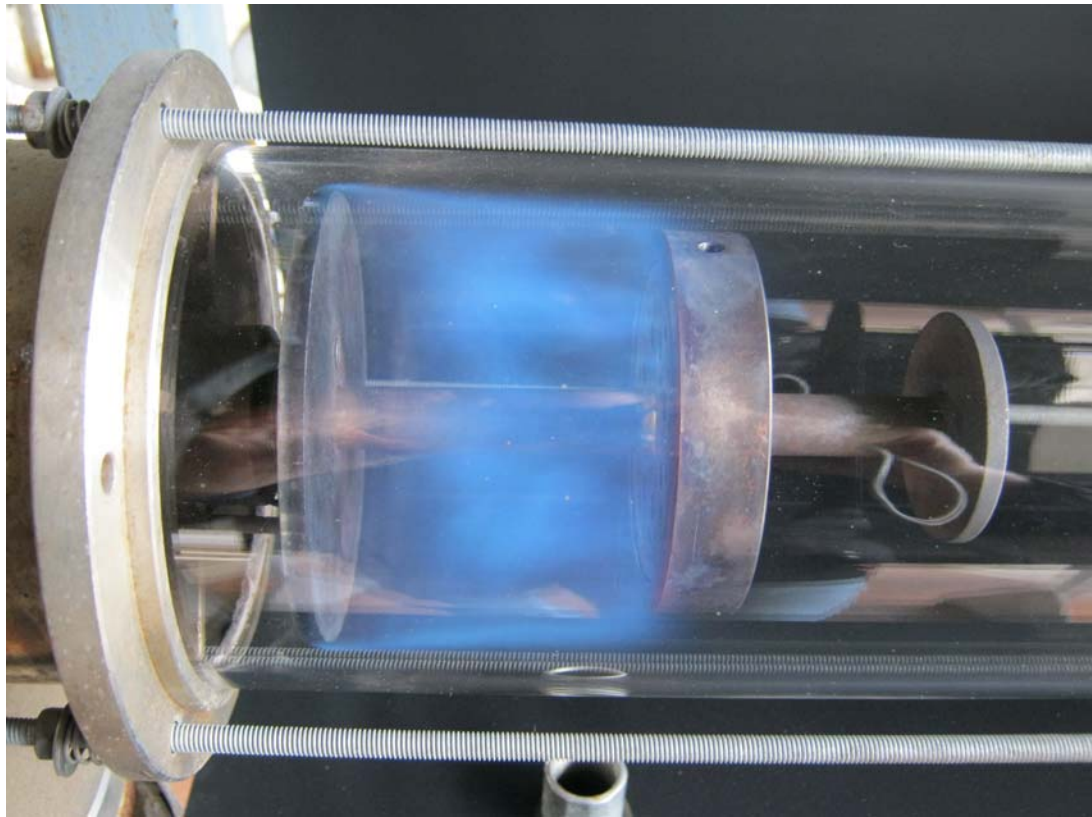
$$\Phi_1 = 1.83$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.11$$

$$F_v = 2$$

$$\text{Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 16 \text{ kW}$$



d)

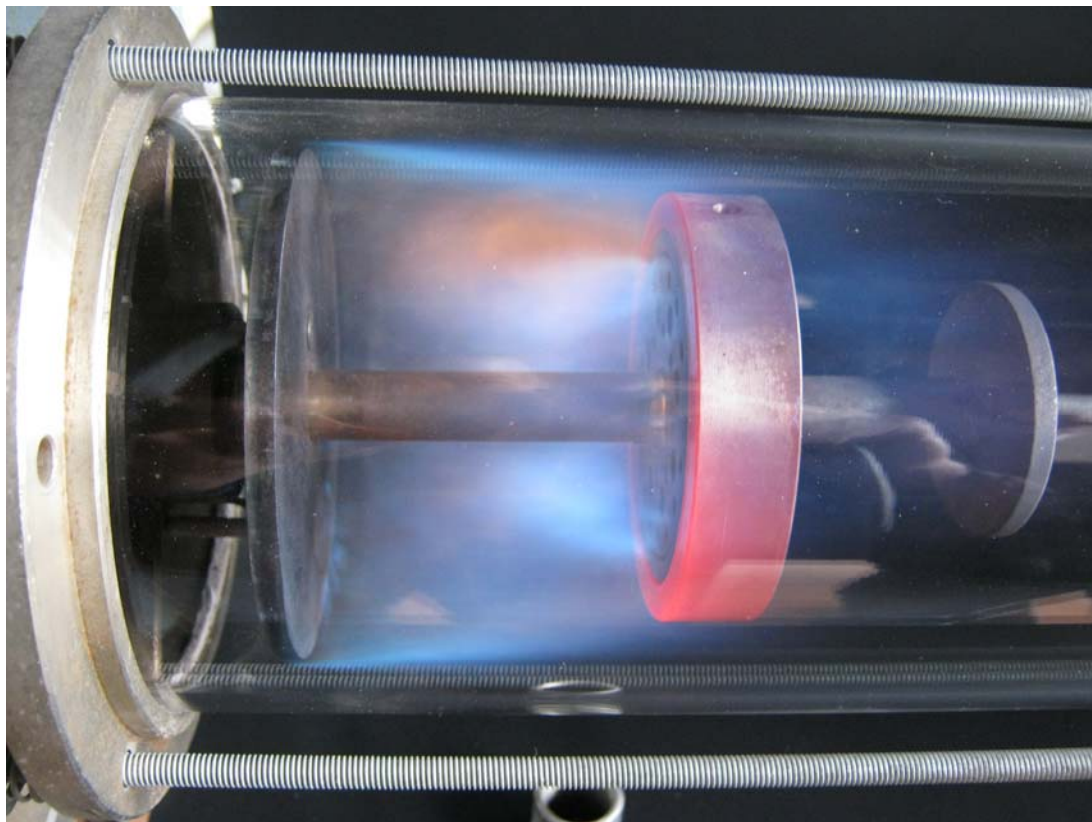
$$\Phi_1 = 2.74$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.17$$

$$F_v = 3$$

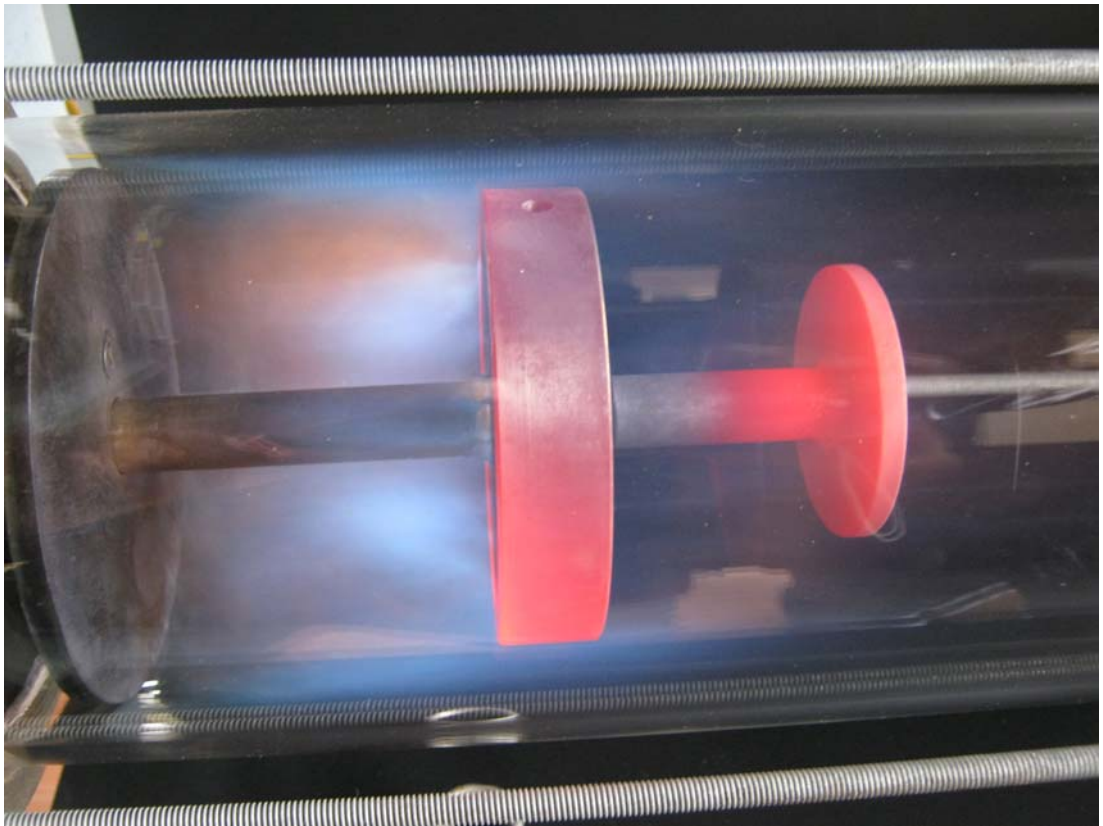
$$\text{Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 24 \text{ kW}$$

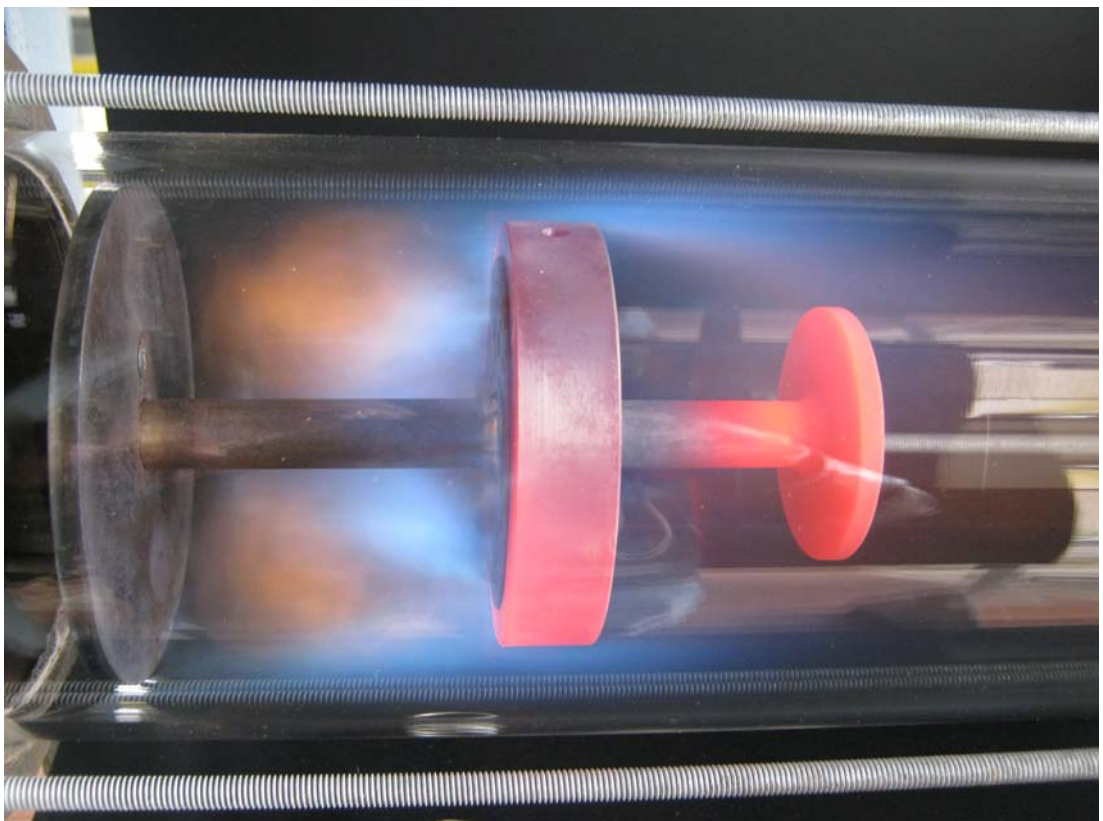




e)  
 $\Phi_1 = 4.03$   
 $\Phi_{tot} = 0.25$   
 $F_v = 4.4$   
 $Nm^3/h$   
 $P = 36 kW$



f)  
 $\Phi_1 = 5.21$   
 $\Phi_{tot} = 0.32$   
 $F_v = 5.7$   
 $Nm^3/h$   
 $P = 46 kW$



**Figura 17:** Immagini con la corona circolare aggiuntiva al *first after-body*, portata di Aria Primaria ( $O_{v\_1}$ ) di  $10.5 Nm^3/h$  e Aria Secondaria ( $O_{v\_2}$ ) di  $160 Nm^3/h$ .

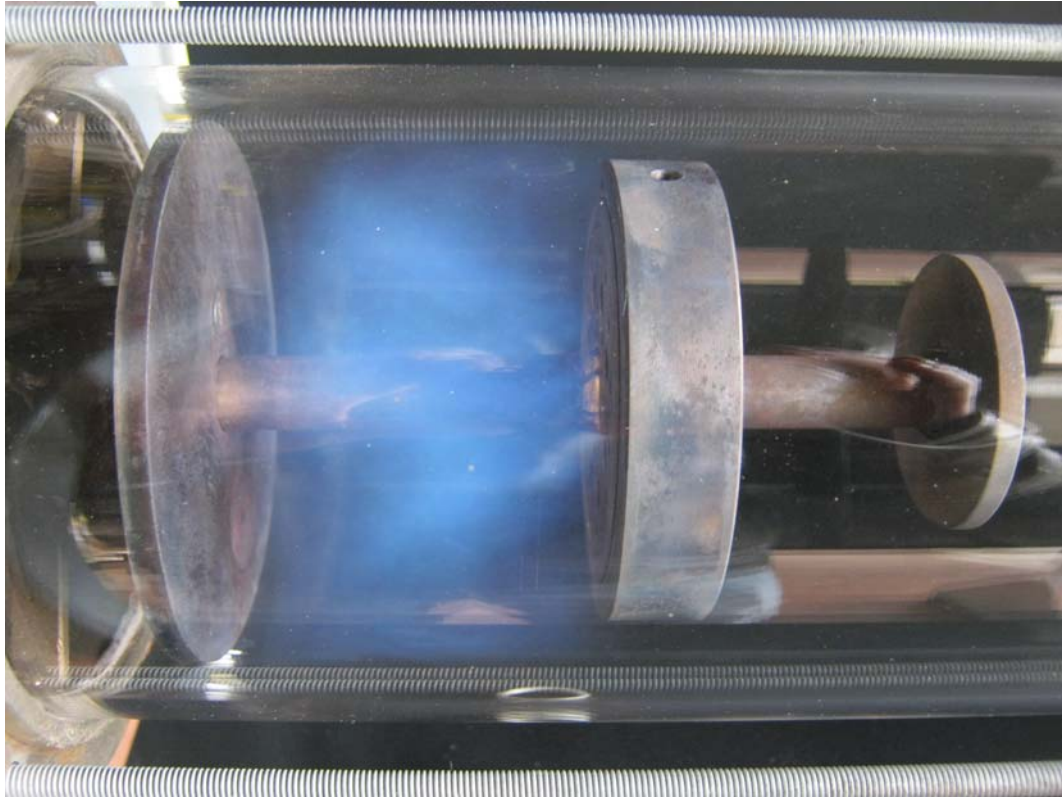
**a)**

$$\Phi_1 = 0.37$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.02$$

$$F_v = 0.4 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 3 \text{ kW}$$

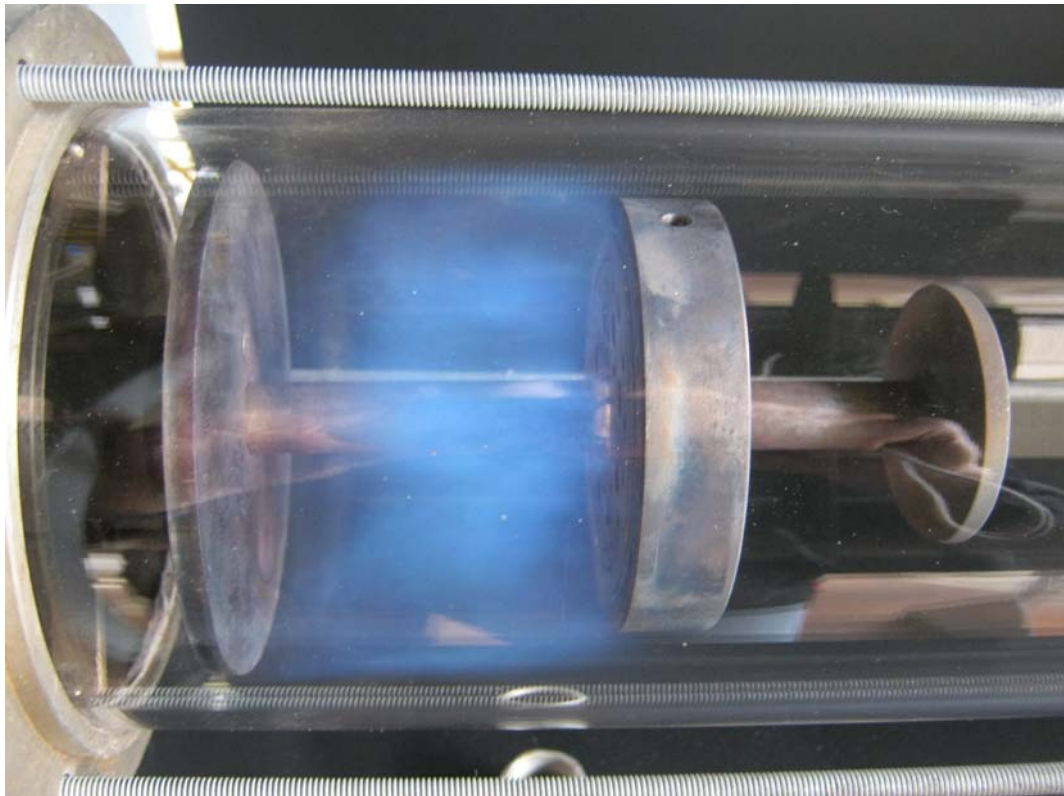
**b)**

$$\Phi_1 = 0.82$$

$$\Phi_{\text{tot}} = 0.05$$

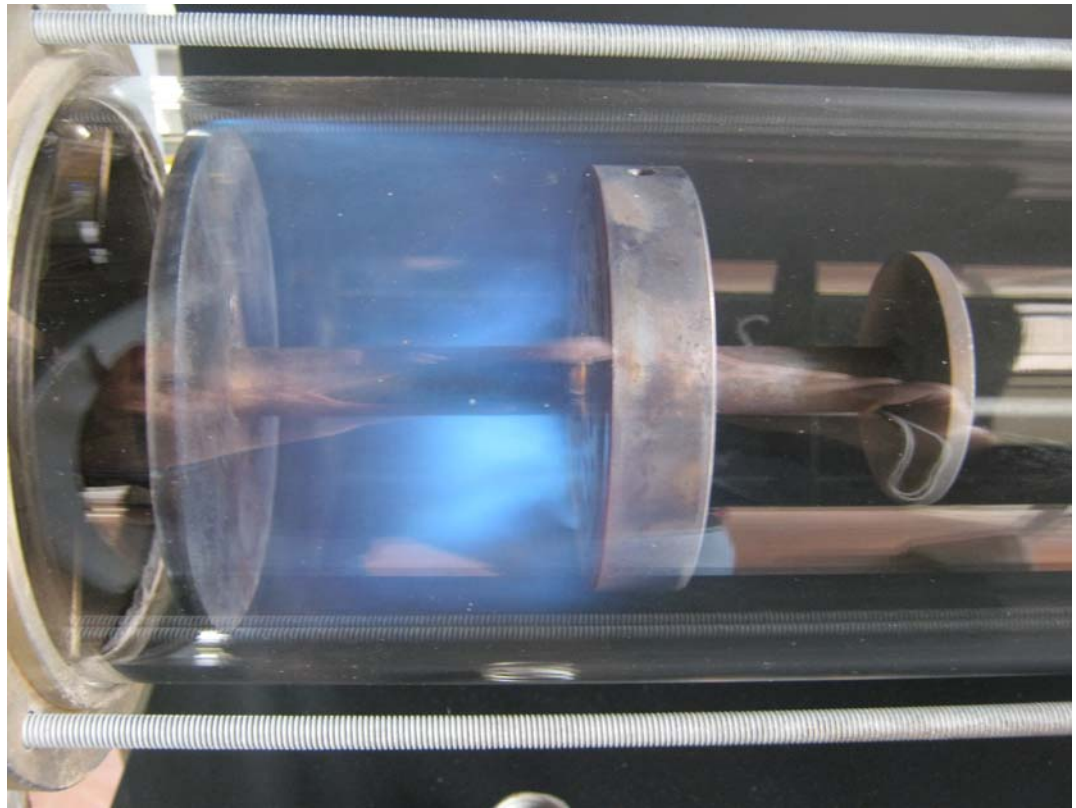
$$F_v = 0.9 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 7 \text{ kW}$$

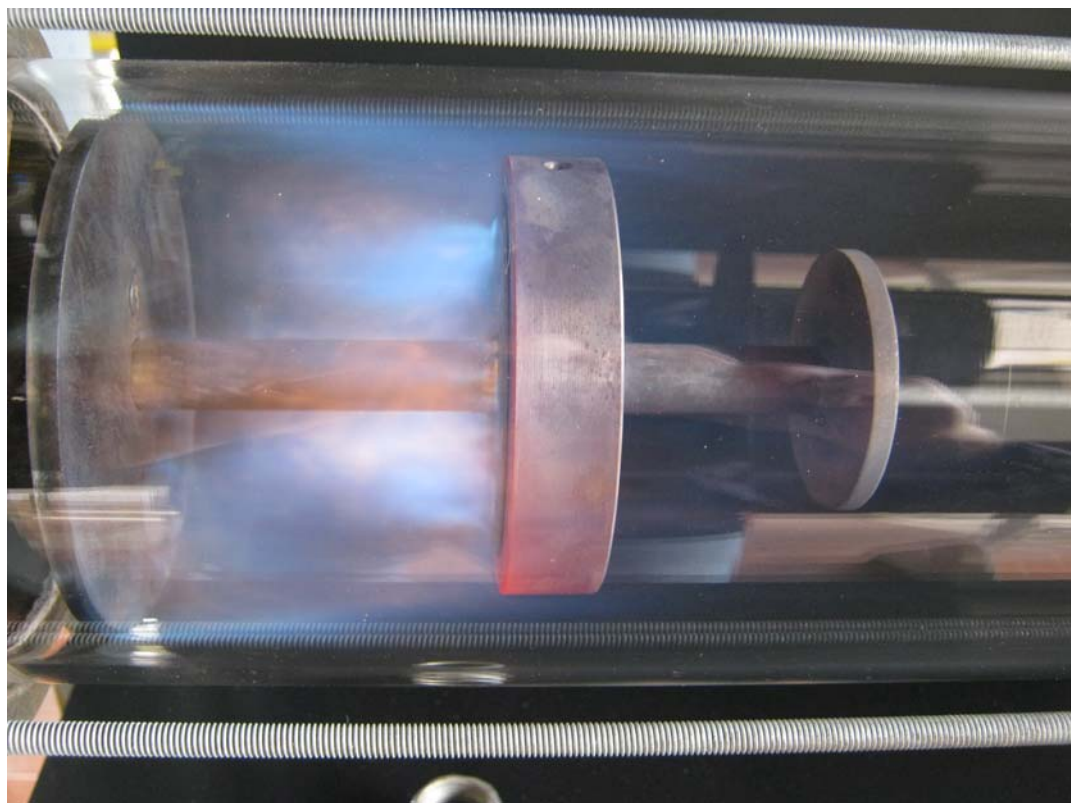




c)  
 $\Phi_1 = 1.83$   
 $\Phi_{tot} = 0.11$   
 $F_v = 2 \text{ Nm}^3/\text{h}$   
 $P = 16 \text{ kW}$



d)  
 $\Phi_1 = 2.74$   
 $\Phi_{tot} = 0.17$   
 $F_v = 3 \text{ Nm}^3/\text{h}$   
 $P = 24 \text{ kW}$



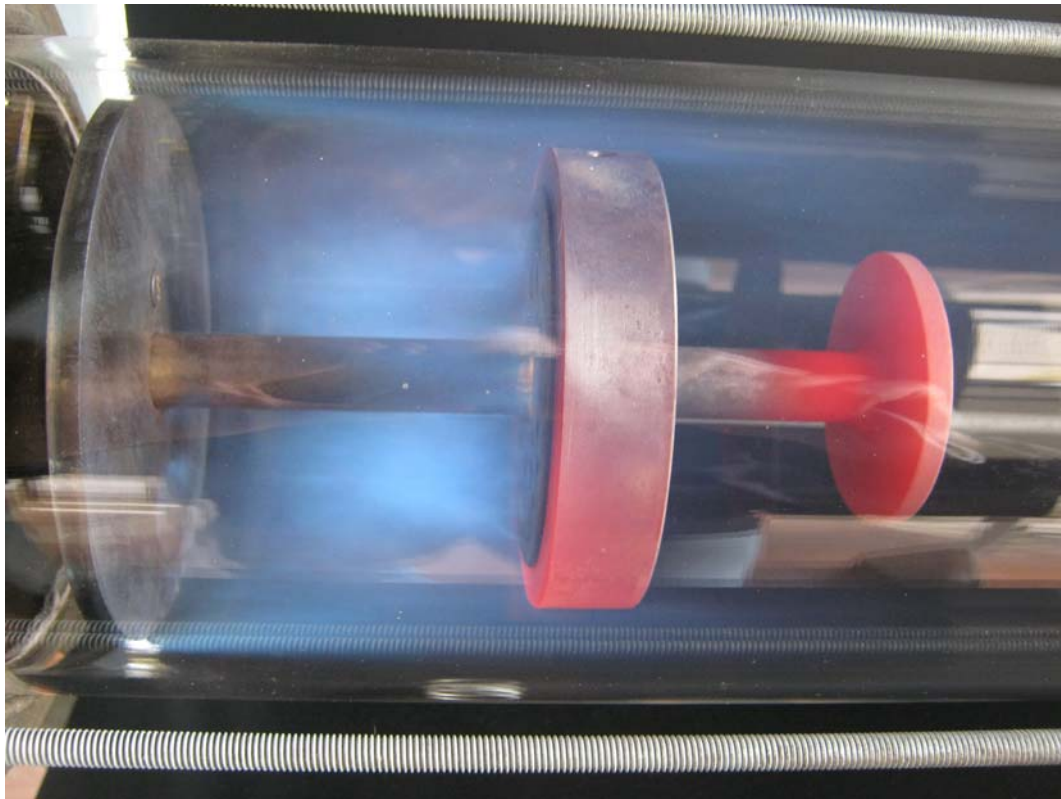
e)

$$\Phi_1 = 4.03$$

$$\Phi_{tot} = 0.25$$

$$F_v = 4.4 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 36 \text{ kW}$$



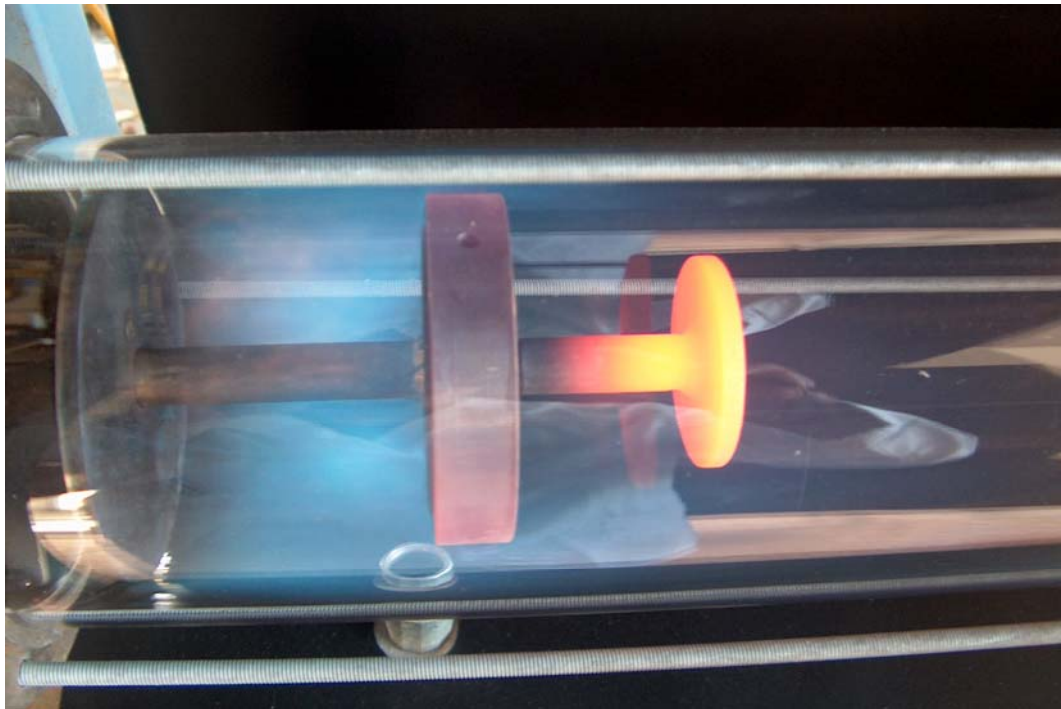
f)

$$\Phi_1 = 5.21$$

$$\Phi_{tot} = 0.32$$

$$F_v = 5.7 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$P = 46 \text{ kW}$$



**Figura 18:** Immagini con la corona circolare aggiuntiva al *first after-body*, portata di Aria Primaria ( $O_{v,1}$ ) di  $10.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  e Aria Secondaria ( $O_{v,2}$ ) di  $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .

### 3.3 Esempio di risultati sperimentali con la metodologia ODC


Nell'analisi dei dati si sono prese in considerazione l'autocorrelazione, la cross-correlazione, gli auto-spettri e i cross-spettri:

- L'**autocorrelazione** ( $R_{xx}$ ) definisce il grado di dipendenza tra i valori assunti da una funzione campionata. L'autocorrelazione è uno strumento matematico usato frequentemente per l'analisi di funzioni o di serie di valori. Essa è la correlazione incrociata del segnale (o più in generale del valore di una variabile) con se stesso. L'autocorrelazione è utile per cercare in un segnale pattern che si ripetono, in modo tale da determinare la presenza di un segnale periodico che è stato sepolto da un rumore, o identificare la frequenza fondamentale di un segnale che non contiene originariamente la componente di frequenza del rumore, bensì varie frequenze armoniche.

Questa funzione è un indice di somiglianza del segnale con se stesso o meglio con una replica di se stesso ritardata di  $\tau$  e permette di individuare andamenti nascosti da rumore e di quantificare l'inerzia del sistema, se è sottoposto a dinamiche di processo.

Se oltre al picco in  $\tau=0$  (dove  $R_{xx}=1$ ) non si hanno altri picchi con ampiezza elevata (ad esempio  $R_{xx} > 0.7$ ) significa che il segnale non presenta periodicità o fenomeni periodici, come ad esempio un distacco periodico di vortici da un bluff-body, uno shear-layer, passaggio di strutture vorticosi, fluttuazioni del fronte di fiamma, vibrazioni, etc.

- La **cross-correlazione** ( $R_{xy}$ , detta anche "correlazione incrociata" o "correlazione mutua") rappresenta la misura di similitudine di due segnali  $x(t)$  ed  $y(t)$  presi nello stesso tempo ma in due punti differenti dello spazio ed è ottenuta come funzione di uno spostamento temporale  $\tau$  applicato ad uno di essi. La cross-correlazione fra due segnali è quindi un indice di quanto si "somigliano" i due segnali. Se la cross-correlazione al tempo  $\tau$  di sfasamento è bassa i due segnali stanno osservando due fenomeni non correlati tra loro, e se i picchi successivi hanno un'ampiezza molto bassa questo indica che non stanno osservando gli stessi fenomeni periodici oppure che questi ultimi non ci sono.
- L'**auto-spettro** ( $S_{xx}$ ), o "**densità spettrale di potenza**" (PSD), è la trasformata di Fourier dell'auto-correlazione. Questa funzione mostra la forza delle variazioni (energia) in funzione della frequenza. In altre parole, mostra a quali frequenze le variazioni sono forti e a quali frequenze sono deboli.

 UTTEI-COMSO	Documento Sigla <b>COMSO/2011/003/IL</b> Rev. 0	Data 24/06/2011	pag. 38 di 52
--	---	--------------------	---------------

E' interessante sapere che in un segnale sono più attive certe frequenze piuttosto che altre; ad esempio questo può mettere in rilievo la parte di rumore e del segnale puro. Nell'analisi di un fluido, sapere che certe frequenze danno un contributo maggiore di altre all'energia ci dice quali scali spaziali sono maggiormente attivate, fatto che magari sarebbe impossibile rilevare da una visualizzazione del campo di velocità. Queste sono alcune delle motivazioni per l'interesse verso lo spettro di Fourier (il modulo della trasformata) e lo spettro dell'energia (il modulo quadro).

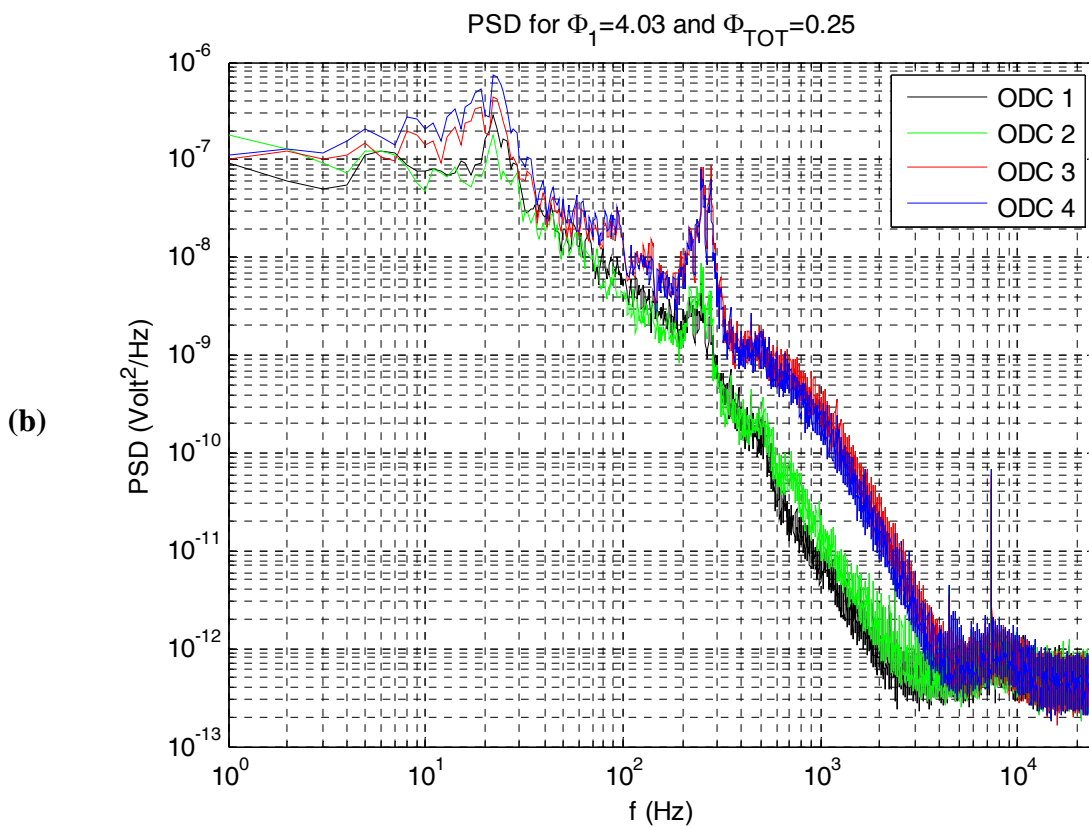
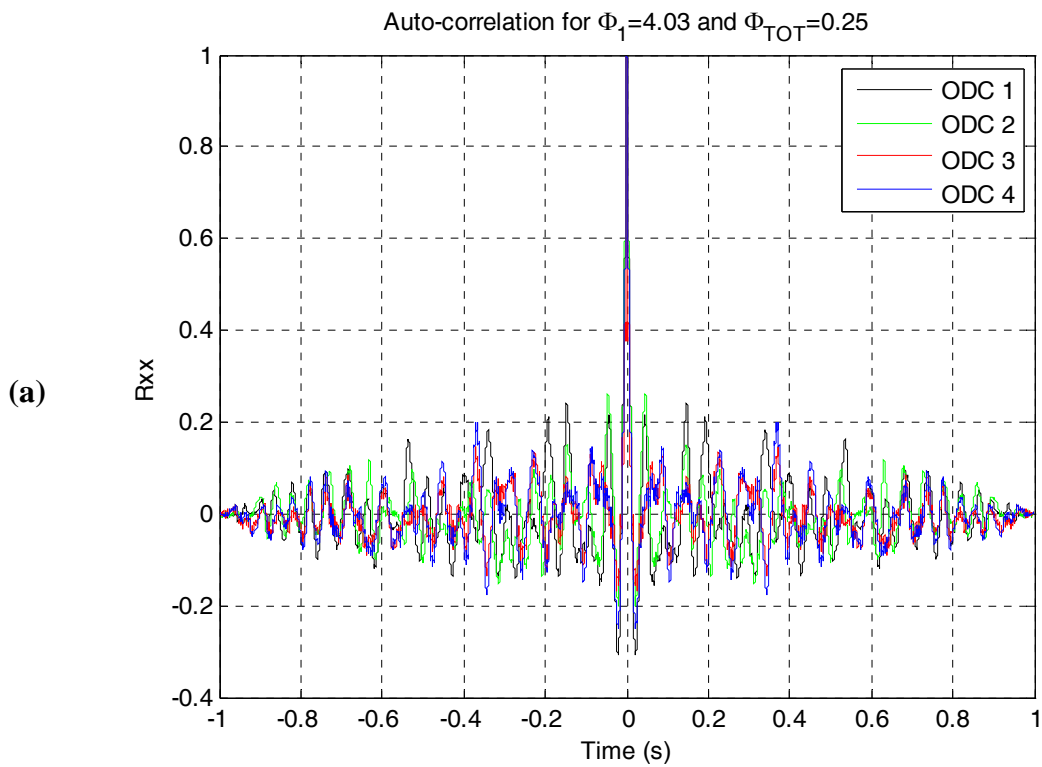
L'auto-spettro è una funzione reale e fornisce l'importante informazione della distribuzione della potenza contenuta nel segnale nel dominio delle frequenze, e quindi in funzione della frequenza. Dal punto di vista teorico è importante osservare che poiché l'auto-spettro è una funzione pari le informazioni alle frequenze negative sono le stesse fornite alle frequenze positive: poiché dal punto di vista fisico non ha significato parlare di frequenze negative, tutto il contenuto energetico viene ribaltato sulle frequenze positive.

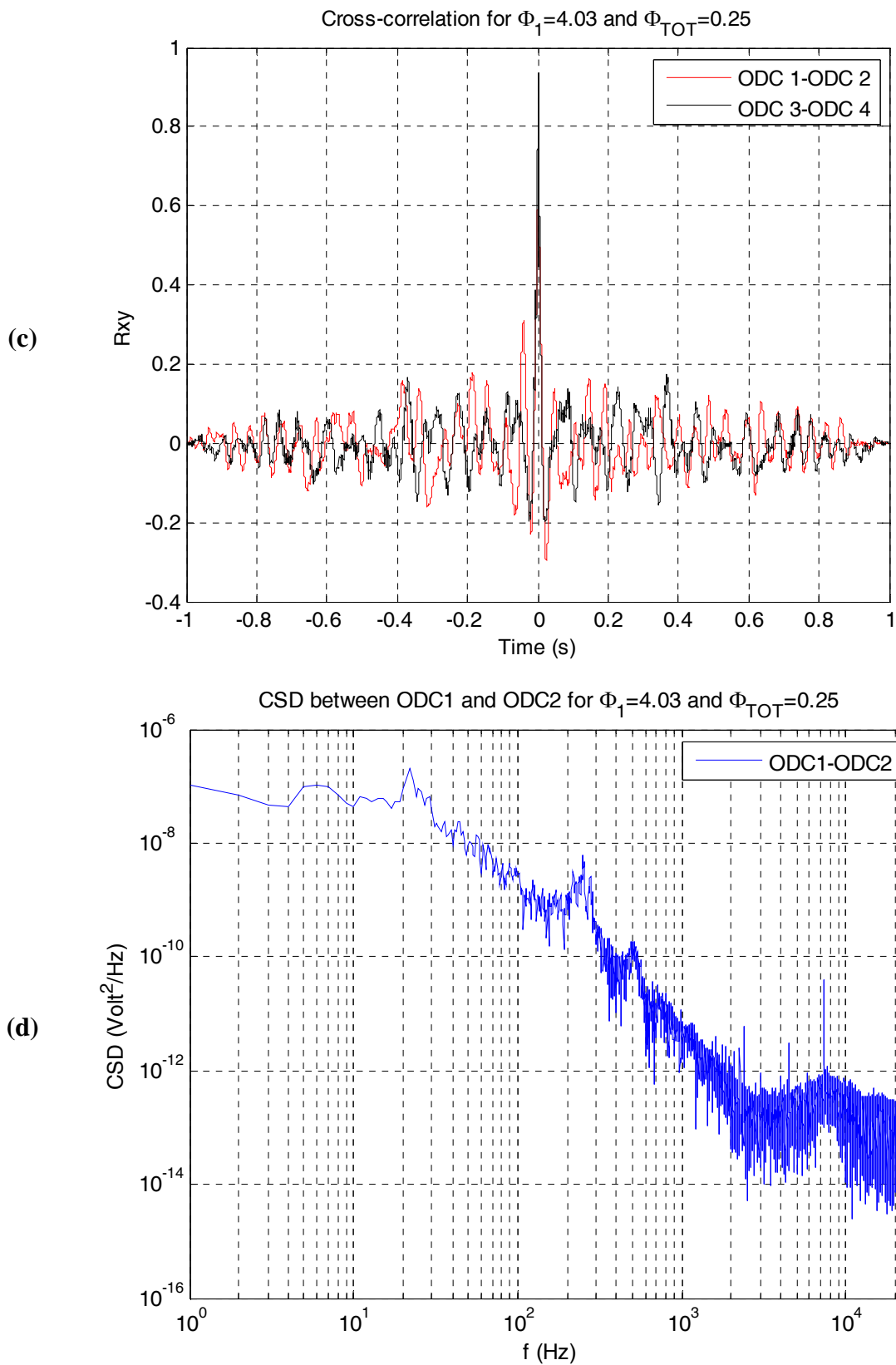
Spesso si utilizzano scale logaritmiche invece di quelle lineari. Le scale lineari sono le più intuitive e sono adatte ad es. per la misura delle distanze o dei tempi. Un grande vantaggio delle scale logaritmiche è la loro capacità di visualizzare piccoli segnali in presenza di grandi segnali; la scalatura logaritmica riesce a visualizzare molta informazione in poco spazio, perché una scala logaritmica comprime le ampiezze elevate ed espande le piccole, permettendo quindi a tutti i componenti di essere visualizzati allo stesso tempo. È questa una necessità, spesso, nelle analisi nel dominio delle frequenze.

- Il **cross-spettro** ( $S_{xy}$ ), o la "**densità spettrale di potenza incrociata**" (CSD), si utilizza quando si hanno due segnali  $x(t)$  ed  $y(t)$  e si vogliono conoscere le relazioni esistenti tra di loro nel dominio della frequenza. E' una funzione nel dominio delle funzioni complesse: il *modulo* del cross-spettro è pari al prodotto dei moduli delle trasformate dei segnali  $x(t)$  e  $y(t)$ ; la *fase* del cross-spettro è la differenza tra le fasi dei due segnali, e rappresenta quindi il ritardo di fase fra i due segnali.

Un esempio dei dati ottenuti da questa sperimentazione sono riportati nella **Figura 19**.



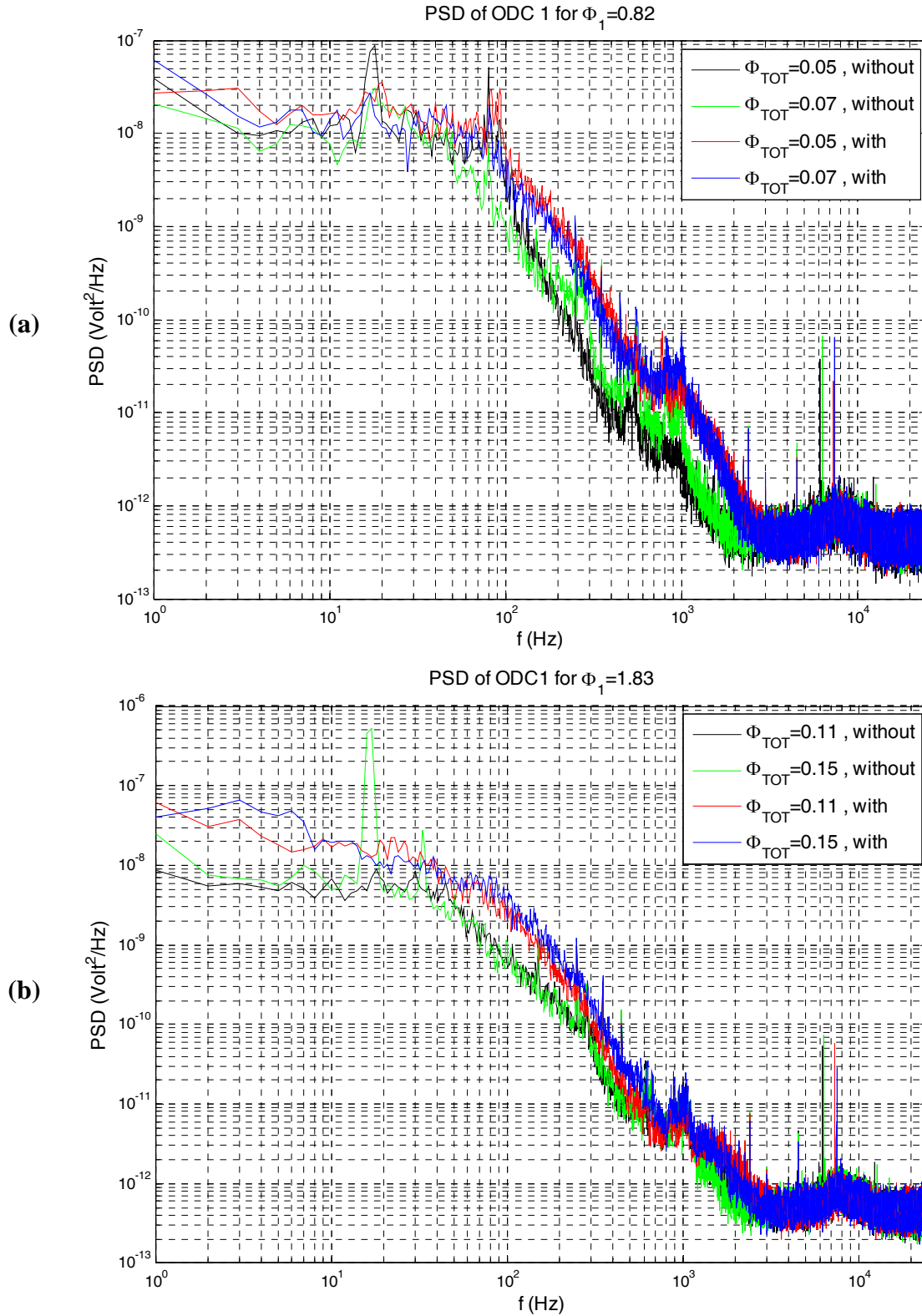


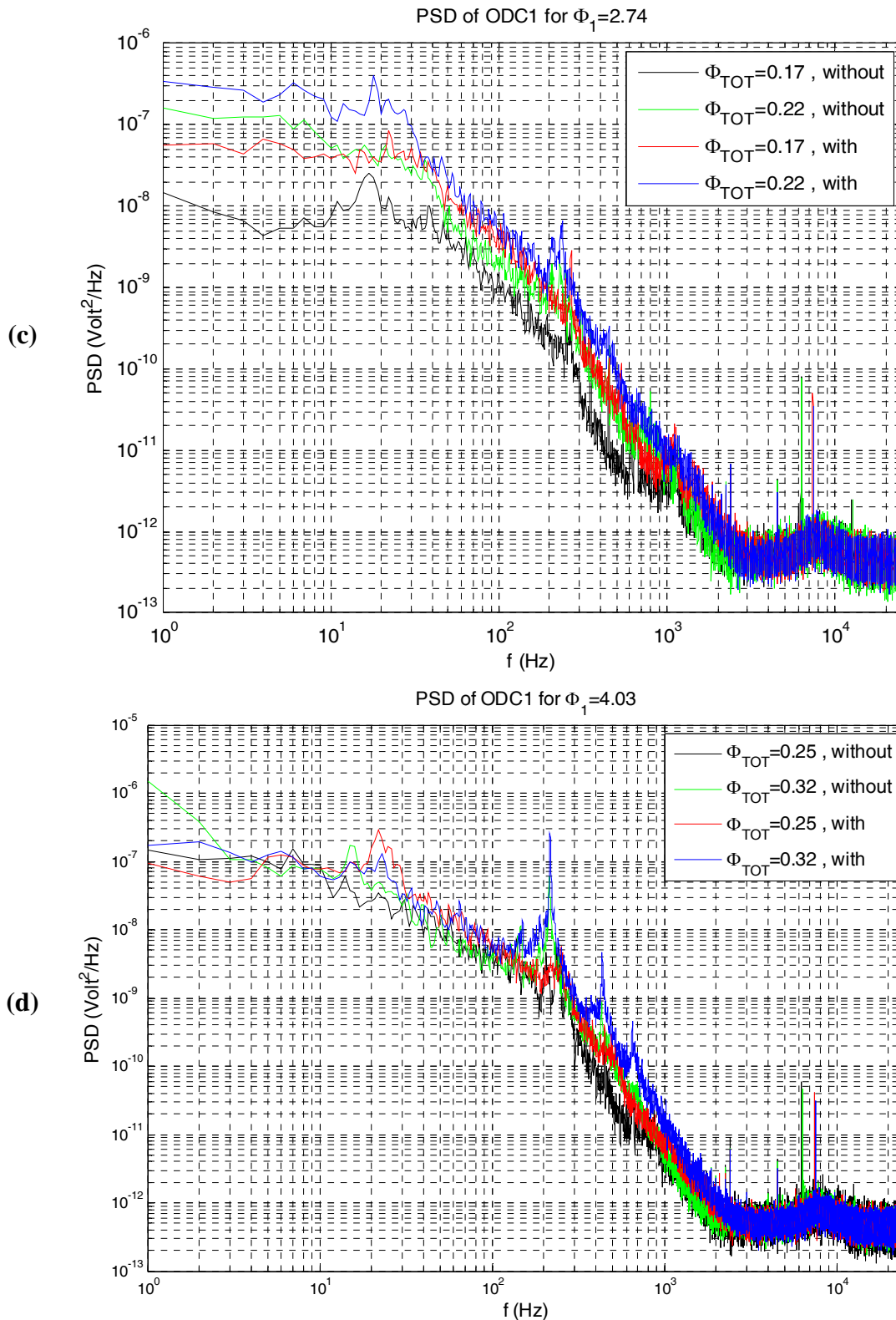


**Figura 19:** Auto-correlazioni (a), Auto-spettri (b), Cross-correlazioni (c) e Cross-spettri (d) dei quattro ODC nella condizione  $\Phi_1=4.03$  e  $\Phi_{TOT}=0.25$  con la corona circolare nel *primo after-body*.

### 3.4 Considerazioni per la sonda ODC1

Si prendono ora in considerazione alcuni autospettri dell'energia radiante ottenuti per l'ODC1.





**Figura 20:** Autospettri dell'energia radiante per la sonda ODC1 a diverse condizioni del rapporto di equivalenza primario:  $\Phi_1=0.82$  (a),  $\Phi_1=1.83$  (b),  $\Phi_1=2.74$  (c),  $\Phi_1=4.03$  (d).

Ogni condizione di  $\Phi_1$  è stata analizzata a due diverse condizioni dei rapporti di equivalenza totali  $\Phi_{TOT}$  (ossia con due diverse portate di aria secondaria;  $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$  e  $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ), sia in assenza della corona circolare ('without') che in sua presenza ('with').

E' interessante notare come in tutti gli autospettri per  $\Phi_1=0.82$  siano presenti picchi alle frequenze di 17 Hz e 80 Hz (Figura 20a).

Negli autospettri per  $\Phi_1=1.83$  (Figura 20b) si hanno dei picchi a circa 17 e 30 Hz modesti per  $\Phi_{TOT}=0.11$  (la portata di aria secondaria è di 160 Nm<sup>3</sup>/h) e molto più accentuati per  $\Phi_{TOT}=0.15$  (la portata di aria secondaria è di 120 Nm<sup>3</sup>/h). Tali picchi tendono a scomparire quando si inserisce la corona circolare evidenziando un comportamento più omogeneo.

In tutti gli autospettri per  $\Phi_1=2.74$ , tranne che nel caso a  $\Phi_{TOT}=0.15$ , si hanno dei picchi a circa 17 Hz (Figura 20c).

Negli autospettri per  $\Phi_1=4.03$  si hanno dei picchi a circa 20 Hz tranne nel caso per  $\Phi_{TOT}=0.25$  senza corona circolare (Figura 20d). Questi auto spettri presentano anche dei picchi alle frequenze rispettivamente di 210 Hz nel caso senza corona circolare e 220 Hz nel caso di inserimento della corona circolare.

Molto probabilmente queste frequenze rilevate dalla sonda ODC1, collocata ad una altezza inferiore a quella del *first after-body* (Figura 14a), sono dovute alla fluttuazione del vortice principale della cavità e non all'eventuale shedding dal bordo del *forebody*.

In tutti gli autospettri (Figura 20) si evidenzia un cambio di pendenza a circa 300 Hz ( $=f_{dissip}$ ), imputabile probabilmente all'inizio del range di dissipazione massima dell'energia,  $6\eta \leq l \leq 60\eta$ , essendo  $l$  una generica scala e  $\eta$  la scala dissipativa o di Kolmogorov. La scala  $\eta$  è così definita:

$$\eta = \frac{L}{(Re_t)^{3/4}} = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}$$

nella quale  $L$  è la lunghezza della scala integrale,  $Re_t = \frac{\rho u' L}{\mu} = \frac{u' L}{\nu}$  con  $u'$  fluttuazione (rms) di

velocità associata alla scala  $L$ , è il Reynolds turbolento,  $\nu$  è la viscosità cinematica del fluido, ed

$\varepsilon = \frac{u_l^3}{l}$  ( $l$  è la generica scala) è la "velocità di dissipazione" oppure il "grado di dissipazione

dell'energia cinetica turbolenta" o meglio la potenza alla quale l'energia è trasferita dalle grandi alle piccole scale.

Facendo un bilancio di potenza si può scrivere che:

$$\varepsilon = \text{cost} \quad \rightarrow \quad \frac{u'^3}{L} = \frac{u_l^3}{l} \quad \rightarrow \quad u_l = l^{1/3} L^{-1/3} u'$$

Dove  $u_l$  è la velocità caratteristica della scala  $l$ , che nel caso particolare di  $l=L$  coincide con la fluttuazione rms della velocità del flusso.

Da simulazioni DNS (Direct Numerical Simulation) il range di massima dissipazione si ha nel range di scale  $(6-60)\eta$ . Poiché, sulla base di precedenti misure, il cambio dipendenza ad alta frequenza nello spettro di potenza è imputabile all'inizio del range dissipativo,  $l=60 \eta$ , si può scrivere che:

$$f_{dissip} = \frac{u_l}{l} \quad \rightarrow \quad f_{dissip} = \frac{u_{60\eta}}{60\eta} = \frac{(60\eta)^{\frac{1}{3}} L^{-\frac{1}{3}} u'}{60\eta} = (60\eta)^{-\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{3}} u'$$

e quindi  $u' = f_{dissip} (60\eta)^{\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{3}}$ .

Andando a sostituire l'espressione di  $\eta$  e del  $Re_t$  (la cui definizione usa  $u'$ ) si ottiene:

$$u' = \left( f_{dissip} 60^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{2}{3}} (\nu L)^{\frac{1}{3}}$$

Assumendo  $f_{dissip}=300$  Hz (letto dagli spettri di potenza) si ottiene una  $u' = 276.5 (\nu L)^{\frac{1}{3}}$ .

Dalla Figura 21, ottenuta da simulazioni numeriche della stessa geometria con portate diverse ma con campo termico analogo a quello del caso  $\Phi_1=4.03$  senza corona, si vede che nella zona osservata dall'ODC1 la viscosità cinematica è  $\nu \sim 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Assumendo come scala integrale  $L$  la dimensione radiale della cavità,  $L \sim 30$  mm, si ottiene una velocità  $u'=6.3$  m/s ed una frequenza di fluttuazione  $f(=u'/L)$  di circa 210 Hz, cosa confermata dalla Figura 20c e Figura 20d.

Per quanto riguarda la velocità di rotazione del vortice si ha che  $v_{rot} = \omega R_{eq}$  dove  $\omega=2\pi f$  e  $R_{eq}$  è il raggio equivalente.

Il *diametro equivalente* (o *diametro idraulico*) è quella grandezza usata in fluidodinamica che permette di individuare un diametro caratteristico anche per sezioni non circolari. Viene definito come il diametro che avrebbe una sezione circolare con dato perimetro bagnato dal fluido

( $P = \pi D_{eq}$ ) e data area della sezione di passaggio ( $A = \pi \frac{D_{eq}^2}{4}$ ). La sua espressione è:

$$D_{eq} = \frac{4A}{P}$$

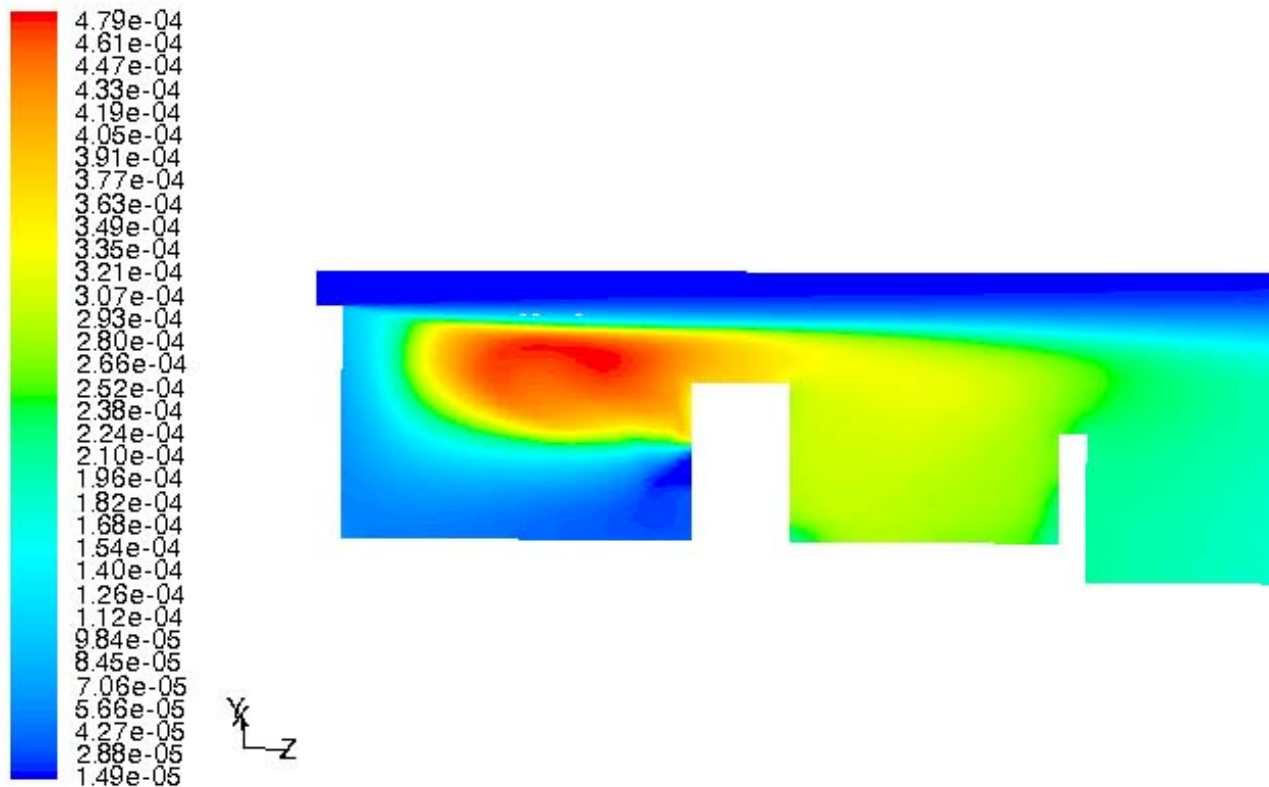
Avendo il vortice nella prima cavità una forma ellissoide con asse maggiore di 70 mm ( $=2a$ ) ed asse minore di 30 mm ( $=2b$ ), avremo che

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} = 169 \text{ mm}, \text{ perimetro dell'ellisse}$$

$$A = \pi ab = 1649 \text{ mm}^2, \text{ area dell'ellisse}$$

Risulta quindi che il diametro equivalente è  $D_{eq} = 39 \text{ mm}$ .

Se si associa la frequenza  $f \sim 20 \text{ Hz}$  alla frequenza di rotazione del vortice, si ottiene una velocità di rotazione di  $v_{rot} \sim 2.45 \text{ m/s}$ , che sarebbe da confermare con misure di velocità e con simulazioni numeriche.




**Figura 21:** Esempio di una mappa della viscosità cinematica ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) calcolata in una RANS con il codice Fluent per la condizione  $\Phi_1=0.8$  e  $\Phi_{TOT}=2$  senza la corona circolare nel *primo after-body*. E' importante dire che in tutte le condizioni di funzionamento i valori della viscosità cinematica sono molto simili.

Essendo il diametro del cilindro in quarzo di  $D=113 \text{ mm}$  e quello del *forebody* di  $d_f=100 \text{ mm}$ , si ottiene una sezione di passaggio dell'aria secondaria di  $A = \frac{\pi(D^2 - d_f^2)}{4} \cong 2174 \text{ mm}^2 = 0.002174 \text{ m}^2$ .

Per una portata di  $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$  si otterrà una velocità d'ingresso di  $15.33 \text{ m/s}$ , e per una portata di  $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$  si otterrà una velocità di  $20.44 \text{ m/s}$ .

Le velocità e relative fluttuazioni sopra ottenute sono compatibili con tali dati.

 UTTEI-COMSO	Documento Sigla <b>COMSO/2011/003/IL</b> Rev. 0	Data 24/06/2011	pag. 46 di 52
--	---	--------------------	---------------

### 3.5 Caso particolare di $\Phi_1=1.83$ e $\Phi_{TOT}= 0.11$

Nella condizione  $\Phi_1=1.83$  e  $\Phi_{TOT}= 0.11$  con una portata di aria secondaria di 160 Nm<sup>3</sup>/h (Tabella 2 punto 3; Figura 17c; Figura 22) e con la corona circolare sul *primo after-body* si evidenzia la formazione di un vortice stabile nella cavità senza shedding periodico (infatti non si rilevano picchi nello spettro della Figura 22b) o formazione di vortici multipli, avvicinandosi quindi ad un comportamento MILD. L'adozione del *secondo after-body* è utile alla stabilizzazione del vortice nella prima cavità.

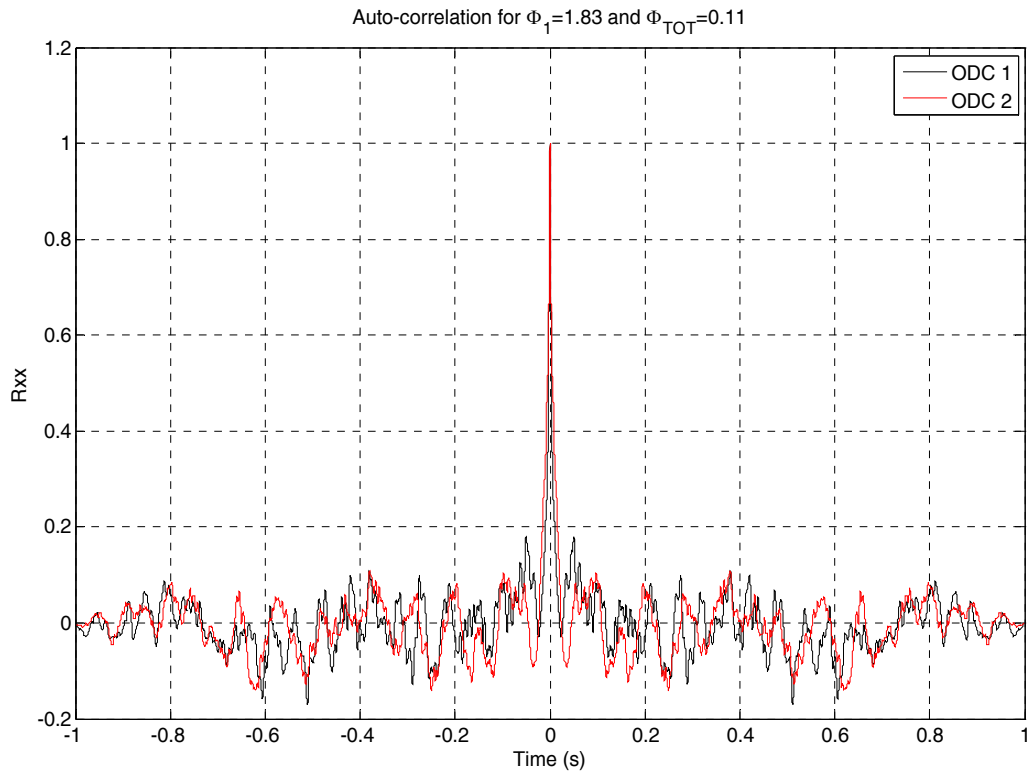
L'*auto-correlazione* degli ODC1 e ODC2 (Figura 22a) oltre al picco per  $\tau=0$  non presenta altri picchi evidenziando un comportamento non periodico dei segnali analizzati. Un simile comportamento può essere evidenziato anche nella *cross-correlazione* (Figura 22c) il cui picco ha un valore basso di circa 0.51.

E' interessante notare che gli spettri dell'ODC (Figura 22b) presentano una pendenza di -4, tipico di un mixing layer bidimensionale [10].

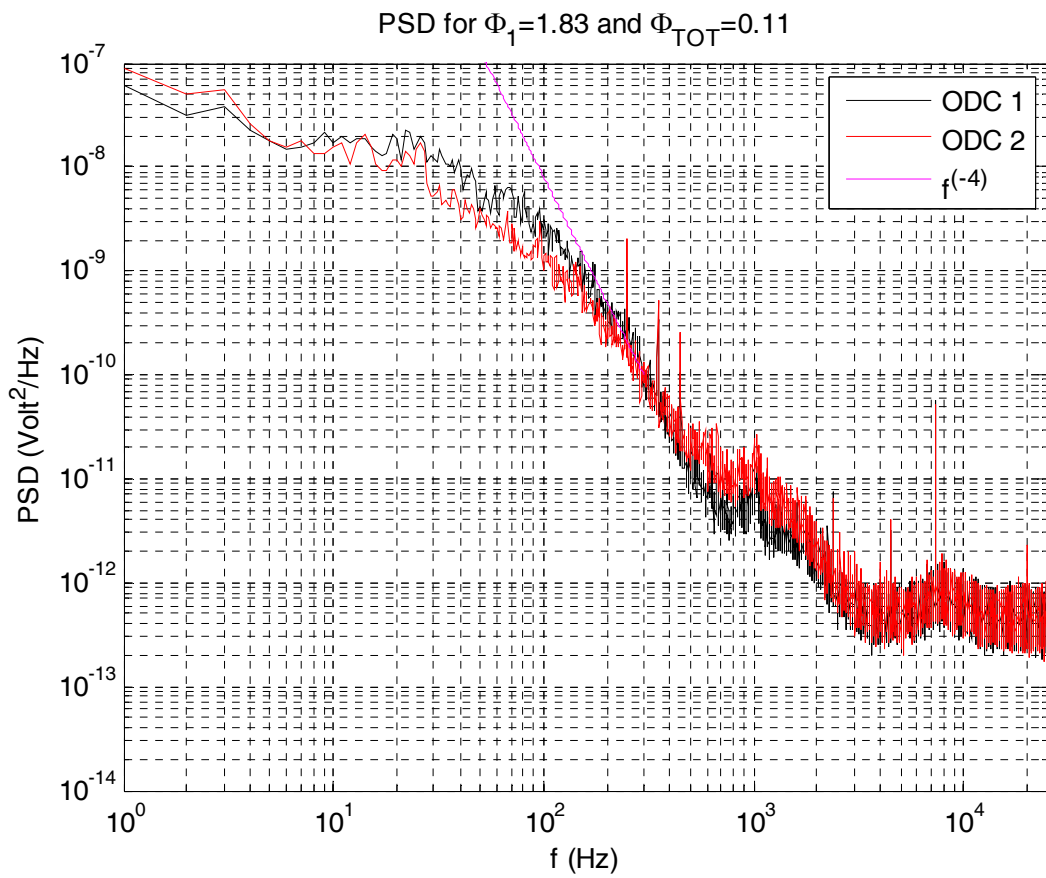
Sia gli *auto-spettri* (Figura 22b) che il *cross-spettro* (Figura 22d) non presentano picchi rilevanti e quindi in questa condizione di funzionamento non si ha una periodicità del segnale, senza shedding periodico, fluttuazioni del fronte di fiamma o formazione di vortici multipli, avvicinandosi quindi ad una combustione distribuita.

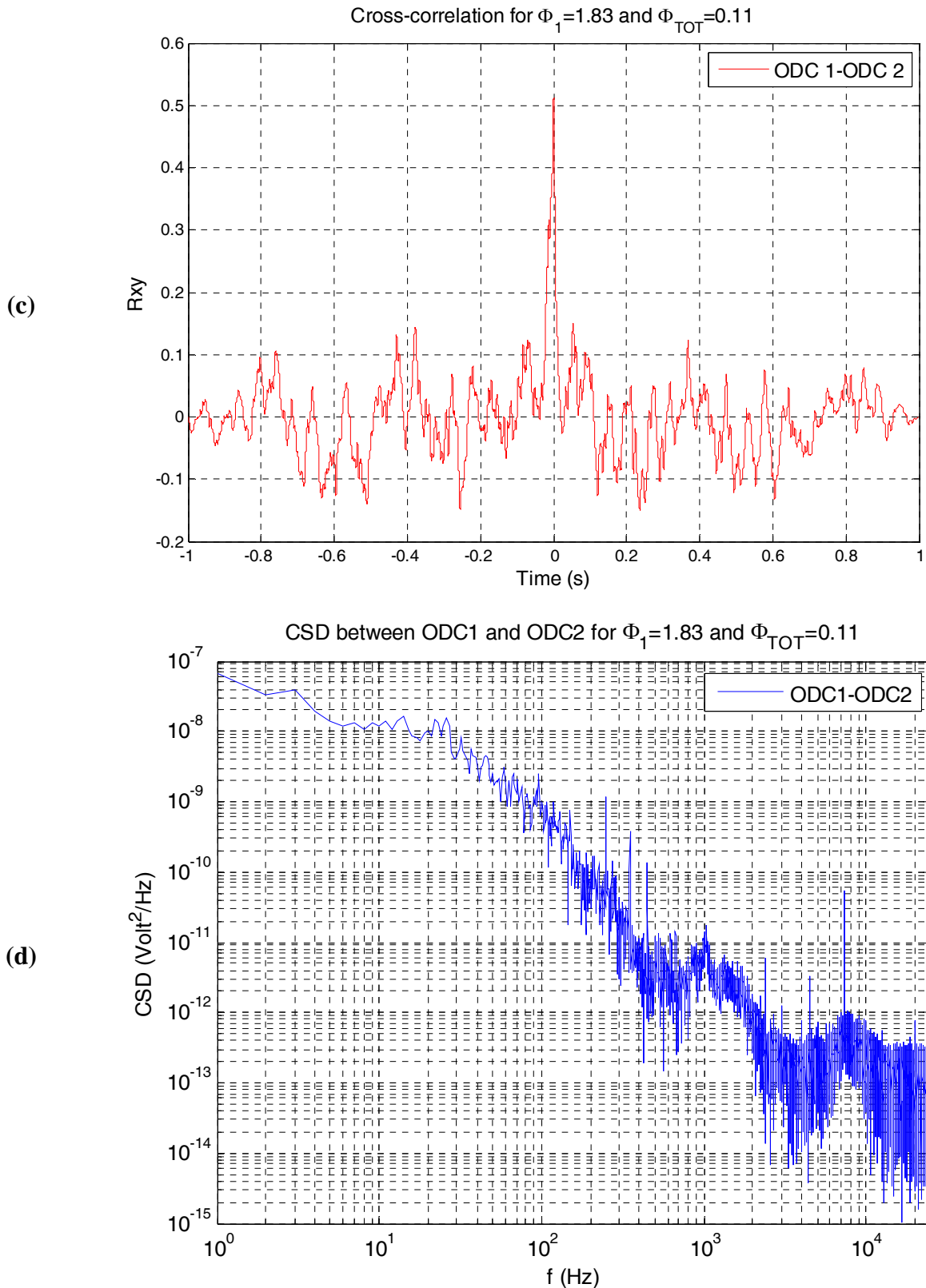


(a)



(b)





**Figura 22:** Auto-correlazioni (a), Auto-spettri (b), Cross-correlazione (c) e Cross-spettro (d) tra gli ODC1 e ODC2 nella condizione  $\Phi_1=1.83$  e  $\Phi_{TOT}=0.11$  con una portata di aria secondaria di  $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$  e con la corona circolare nel *primo afterbody*.

## 4. Conclusioni

Numericamente si era pensato di cercare di aumentare il flusso di aria primaria nella prima cavità in modo che la reazione procedesse il più possibile prima che i gas parzialmente combusti venissero in contatto con la corrente anulare [2]. Non potendo confidare troppo sull'ingresso dell'aria anulare nella cavità, sarebbe stato necessario addurre una maggiore quantità di aria primaria magari fino ad ottenere rapporti di equivalenza primari circa stechiometrici. I dati sperimentali raccolti supportano questa ipotesi.

Si è potuto constatare però che l'incremento della portata d'aria primaria oltre un certo limite, che corrisponde chiaramente ad un incremento della velocità di ingresso, porta allo spegnimento della fiamma [2].

L'unico modo di ovviare a questo inconveniente è di invertire i fori di adduzione dell'aria primaria e del combustibile. Infatti la superficie dei fori grandi è circa una volta e mezzo quella dei fori piccoli.

Così facendo, per portate di combustibile corrispondenti a circa 50 kWt, si riesce a contenere la velocità di uscita dell'aria a valori accettabili anche per rapporti stechiometrici, senza spegnere la fiamma. L'inversione dei fori comporta un incremento della velocità di uscita del combustibile, che però rimane intorno a valori comunque bassi, tali da non pregiudicare la stabilità della fiamma. Le prestazioni incrementano sensibilmente con efficienze di combustione di circa il 98% [2].

Sarebbe inoltre necessario usare aria preriscaldata oppure gas esausti in modo da agevolare la combustione.

## 5. Bibliografia

- [1] Di Nardo A., Calchetti G., Mongiello C.; “Nuove linee di sviluppo del sistema Trapped Vortex per turbine a gas. Analisi della combustione MILD in vortici intrappolati”; Rapporto Tecnico COMSO/2010/002/ER (Classificazione UTTEI-COMSO), 16/07/2010.
- [2] Di Nardo A., Calchetti G., Giammartini S., Mongiello C., Rufoloni M.; “La tecnologia Trapped Vortex per la Combustione di Syngas”; Rapporto Tecnico EHE09002 (Classificazione ENE), 14/01/2009.
- [3] Giulietti E., Giammartini S., Guidarelli G., Sardella B., Lombardi V., Grasso A.; “Sviluppo di un bruciatore a ‘Vortice Intrappolato’ per applicazione in Turbine a Gas: Realizzazione di una facility sperimentale di prova”; Rapporto tecnico EHI10004 (Classificazione ENE-IMP), Aprile 2010.
- [4] Roquemore W.M., Shouse D., Burrus D., Johnson A., Cooper C., Duncan B., Hsu K.Y., Katta V.R., Sturgess G.J., and Vihinen I., “Trapped Vortex Combustor Concept for Gas Turbine Engines”, AIAA Paper 2001-0483, 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, 8-11 January 2001.
- [5] Mair W.A., “The effect of a Rear-Mounted Disc on the Drag of a Blunt Based body of revolution”, The Aeronautical Quarterly, Issue 16, pp.350-360, November 1965.
- [6] Little Jr. B.H. and Whipkey R.R., “Locked vortex afterbodies”, presented as paper 78-1179 at the AIAA 11<sup>th</sup> Fluid and Plasma Dynamics Conference, Seattle, Wash., July 10-12, 1978.
- [7] Little Jr. B.H. and Whipkey R.R., “Locked vortex afterbodies”, Journal of Aircraft, Vol. 16, No.5, pp. 296-302, 1979.
- [8] Di Marco A., “Numerical analysis of the hydrogen combustion in a double cavity Trapped Vortex Combustor”, PhD Thesis, Università degli Studi di “Roma TRE”, March 2009.
- [9] Giacomazzi E., Troiani G., Giulietti E., Bruschi R., “Effect of Turbulence on Flame Radiative Emission”, Experiments in Fluids, Springer Berlin/Heidelberg, vol.44, Issue 4, pp.557-564, April 2008.
- [10] Lesieur M., “Turbulence in Fluids – Stochastic and numerical modelling”, Martinus Nijhoff Publishers, 1987.

## Indice delle figure

<b>Figura 1:</b> Disegno del bruciatore TVC : .....	8
<b>Figura 2:</b> Particolare del sistema di alimentazione del bruciatore TVC: il percorso dell'aria è indicato con frecce di colore blu, quello del combustibile (CH <sub>4</sub> o H <sub>2</sub> ) con frecce rosse.....	8
<b>Figura 3:</b> Particolare del disegno del bruciatore TVC: A) Forebody; B) First Afterbody; C) Second Afterbody. Il percorso dell'aria è indicato con frecce di colore blu, quello del combustibile (CH <sub>4</sub> o H <sub>2</sub> ) con frecce di colore rosso. ....	9
<b>Figura 4:</b> Schema del bruciatore TVC nel quale sono riportate alcune grandezze geometriche. ....	9
<b>Figura 5:</b> Tracciature di alimentazioni (aria + combustibile) sulla faccia interna dell'after-body. La tracciatura di figura 8(a) è quella utilizzata per il metano, mentre quella di Figura 8(b) è relativa all'idrogeno. In Figura 8(c) assonometria del TVC con indicazione schematica delle due possibili tracciature del disco di alimentazione dell'after-body.....	10
<b>Figura 6:</b> Immagini di particolari del bruciatore TVC. Nelle fotografie (b) e (d) sono evidenti i fori da cui il combustibile (CH <sub>4</sub> o H <sub>2</sub> ) e il comburente (Aria) vengono iniettati.....	11
<b>Figura 7:</b> Bruciatore TVC privo del liner esterno in quarzo. In basso al centro è possibile vedere il posizionamento del rivelatore di fiamma.....	12
<b>Figura 8:</b> Bruciatore TVC inserito all'interno del liner in quarzo ottico che ne costituisce la camera di combustione. ....	12
<b>Figura 9:</b> Esempio di linee di corrente di velocità (a) e i corrispondenti vettori di velocità (b) che mostrano i vortici principali nella prima cavità di questo bruciatore TVC [8].....	13
<b>Figura 10:</b> Vettori di velocità (m/s) [2].....	14
<b>Figura 11:</b> Generico spettro elettromagnetico.....	17
<b>Figura 12:</b> Spettro del UV, Visibile e IR. ....	17
<b>Figura 13:</b> Spettro del Visibile e colori corrispondenti.....	19
<b>Figura 14:</b> Schema del set-up sperimentale in cui si evidenzia la posizione delle sonde ODC durante l'acquisizione (a) e immagine del set-up (b).....	24
<b>Figura 15:</b> Immagini con il <i>first after-body</i> a dimensioni normali ( <b>senza corona circolare</b> aggiuntiva), portata di Aria Primaria (O <sub>v_1</sub> ) di 10.5 Nm <sup>3</sup> /h e Aria Secondaria (O <sub>v_2</sub> ) di <b>160 Nm<sup>3</sup>/h</b> .28	
<b>Figura 16:</b> Immagini con il <i>first after-body</i> a dimensioni normali ( <b>senza corona circolare</b> aggiuntiva), portata di Aria Primaria (O <sub>v_1</sub> ) di 10.5 Nm <sup>3</sup> /h e Aria Secondaria (O <sub>v_2</sub> ) di <b>120 Nm<sup>3</sup>/h</b> .30	
<b>Figura 17:</b> Immagini <b>con la corona circolare</b> aggiuntiva al <i>first after-body</i> , portata di Aria Primaria (O <sub>v_1</sub> ) di 10.5 Nm <sup>3</sup> /h e Aria Secondaria (O <sub>v_2</sub> ) di <b>160 Nm<sup>3</sup>/h</b> .....	33
<b>Figura 18:</b> Immagini <b>con la corona circolare</b> aggiuntiva al <i>first after-body</i> , portata di Aria Primaria (O <sub>v_1</sub> ) di 10.5 Nm <sup>3</sup> /h e Aria Secondaria (O <sub>v_2</sub> ) di <b>120 Nm<sup>3</sup>/h</b> .....	36
<b>Figura 19:</b> Auto-correlazioni (a), Auto-spettri (b), Cross-correlazioni (c) e Cross-spettri (d) dei quattro ODC nella condizione $\Phi_1=4.03$ e $\Phi_{TOT}=0.25$ con la corona circolare nel <i>primo after-body</i> . ....	40



- Figura 20:** Autospettri dell'energia radiante per la sonda ODC1 a diverse condizioni del rapporto di equivalenza primario:  $\Phi_1=0.82$  (a),  $\Phi_1=1.83$  (b),  $\Phi_1=2.74$  (c),  $\Phi_1=4.03$  (d)..... 42
- Figura 21:** Esempio di una mappa della viscosità cinematica ( $m^2/s$ ) calcolata in una RANS con il codice Fluent per la condizione  $\Phi_1=0.8$  e  $\Phi_{TOT}=2$  senza la corona circolare nel *primo after-body*. E' importante dire che in tutte le condizioni di funzionamento i valori della viscosità cinematica sono molto simili. .... 45
- Figura 22:** Auto-correlazioni (a), Auto-spettri (b), Cross-correlazione (c) e Cross-spettro (d) tra gli ODC1 e ODC2 nella condizione  $\Phi_1=1.83$  e  $\Phi_{TOT}=0.11$  con una portata di aria secondaria di  $160 Nm^3/h$  e con la corona circolare nel *primo afterbody*. .... 48

## 6. LISTA di DISTRIBUZIONE del DOCUMENTO

	<b>a:</b>	<b>formato</b>
1	Archivio COMSO	PDF
2	Celata G.	PDF
3	Giammartini S.	PDF
4	Girardi G.	PDF
5	Arcidiacono N. M.	PDF
6	Calabrò A.	PDF
7	Calchetti G.	PDF
8	Cassani S.	PDF
9	Cecere D.	PDF
10	Di Nardo A.	PDF
11	Donato F.	PDF
12	Giacomazzi E.	PDF
13	Giulietti E.	PDF
14	Guidarelli G.	PDF
15	Marrocco M.	PDF
16	Mongiello C.	PDF
17	Nobili M.	PDF
18	Pagliari L.	PDF
19	Picchia F.R.	PDF
20	Rufoloni M.	PDF
21	Stringola C.	PDF
22	Troiani G.	PDF